

**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal**

**Luiz Carlos Araújo**

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE E DA VELOCIDADE DO *FORWARDER* EM  
ÁREAS INCLINADAS**

**Diamantina - MG**  
**2019**

**Luiz Carlos Araújo**

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE E DA VELOCIDADE DO *FORWARDER* EM  
ÁREAS INCLINADAS**

Tese apresentada à Universidade Federal dos Vales  
do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das  
exigências do Programa de Pós-Graduação em  
Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor  
Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Márcio Pinto Leite

**Diamantina-MG  
2019**

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A663m

Araujo, Luiz Carlos

Modelagem da produtividade e da velocidade do forwarder em áreas inclinadas / Luiz Carlos Araujo, 2019.

87 p. : il.

Orientador: Ângelo Márcio Pinto Leite

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal)  
- Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,  
Diamantina, 2019.

1. Extração florestal. 2. Rendimento operacional. 3. Sistemas de  
Informações Geográficas (SIG). I. Leite, Ângelo Márcio Pinto. II.  
Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

**CDD 631.3**

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE E DA VELOCIDADE DO  
FORWARDER EM ÁREAS INCLINADAS**

Tese apresentada ao DOUTORADO  
EM CIÊNCIA FLORESTAL, nível de  
DOUTORADO como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
DOUTOR EM CIÊNCIA FLORESTAL

Orientador (a): Prof. Dr. Ângelo Márcio  
Pinto Leite

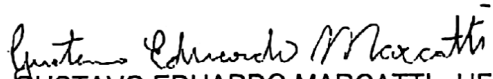
Data da aprovação : 05/04/2019



Prof.Dr. ÂNGELO MÁRCIO PINTO LEITE - UFVJM



Prof.Dr. MÁRCIO LELES ROMARCO DE OLIVEIRA - UFVJM



Prof.Dr. GUSTAVO EDUARDO MARCATTI - UFSJ



Prof.Dr. SIDNEY ARAUJO CORDEIRO - UFVJM



Prof.Dr. WELLINGTON WILLIAN ROCHA - UFVJM

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por mais esta conquista, pela coragem e força para enfrentar os desafios que a vida impõe.

Aos meus pais pela compreensão, confiança e, acima de tudo, amor incondicional. Pelos admiráveis exemplos e constantes incentivos, por serem sempre presentes e eternos torcedores pelo meu sucesso, esta vitória é de vocês.

Aos meus familiares, em especial meus irmãos: Danielle, Luana, Thaís e Thiago, pelos incentivos e companheirismo.

À minha esposa Cíntia pela paciência, força e principalmente por seu amor incondicional. Obrigado por estar ao meu lado.

Agradeço especialmente aos meus filhos Ana Luiza e Luiz Otávio que são o maior presente que Deus poderia ter me dado nesta vida. Por toda felicidade, carinho, compreensão, apoio, incentivo, dedicação encontrada na minha querida família que sempre farão parte de cada vitória.

Ao Professor Ângelo Márcio P. Leite, pela orientação, pela paciência e amizade, pelas sugestões e pelo apoio.

Aos professores Gustavo Eduardo Marcatti, Márcio Leles Romarco de Oliveira, Sidney Araújo Cordeiro e Wellington Wiliam pelas contribuições na realização deste trabalho, pelas sugestões e pela atenção.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal, pelo oferecimento do curso.

À empresa cedente dos dados, pela confiança depositada, em especial aos Eng. Florestais Bruno Ricardo Fernandes e Guilherme Augusto Santana, e toda equipe de campo da Colheita Florestal, por todo o apoio e suporte que me foi prestado.

Ao Hugo e João Victor pelo auxílio na execução desta pesquisa.

Aos Amigos que sempre estiveram presentes durante todo esse processo de aprendizado, pela amizade durante todos esses anos de convivência.

Aos irmãos e amigos da Igreja Batista Regular pelas orações e incentivos.

Enfim, a todos que contribuíram e possibilitaram o desenvolvimento desta tese.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar. É melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo o nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, que em conformidade viver.”

Martin Luther King.

## **BIOGRAFIA**

Luiz Carlos Araújo, filho de Luiz Saraiva de Araújo e Maria José Gandra Araújo, brasileiro, nascido em 08 de setembro de 1985 na cidade de Gouveia-MG.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM em março de 2007, concluindo o curso de graduação em julho de 2011.

Em março de 2012 iniciou o mestrado em Ciência Florestal na mesma instituição, defendendo sua dissertação em março de 2014.

Em março de 2015 iniciou o doutorado no Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal da UFVJM, defendendo sua tese em abril de 2019.



## RESUMO

Conhecer a produtividade e o comportamento das máquinas de colheita florestal é essencial para o planejamento adequado das atividades operacionais a serem realizadas em campo. Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivo modelar a produtividade e velocidade do *forwarder* na extração de toras curtas em áreas inclinadas, bem como avaliar o uso de ferramenta SIG na extração florestal com *forwarder*. A pesquisa foi desenvolvida, entre os meses de janeiro e junho de 2018, em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de uma empresa florestal situada no estado de Minas Gerais. Foi utilizado o estudo de tempos e movimentos para avaliar o processo produtivo e determinar os índices de eficiência operacional, disponibilidade mecânica e taxa de utilização do *forwarder*. Estes parâmetros, assim como a produtividade efetiva da máquina foram avaliados em duas condições, denominadas de área de colheita sem guincho (inclinações entre 0 e 27°) e área de colheita com guincho (inclinações entre 27 e 36°). Nesta pesquisa desenvolveu-se, por meio de funcionalidades disponíveis no Sistema de Informações Geográficas ArcGIS, um método capaz de estimar a distância de extração de madeira com *forwarder*, tal como, valores de inclinação ao longo do eito de trabalho desta máquina, permitindo assim predizer seu rendimento operacional. Os resultados mostraram que as atividades parciais que consumiram o maior tempo do ciclo operacional da extração de madeira foram o carregamento e o descarregamento, em ambas as inclinações do terreno. A produtividade da máquina diminuiu com o aumento da inclinação do terreno e da distância de extração, sendo este aumento mais pronunciado em relação a variável distância de extração. O *forwarder* alcançou maior capacidade de extração de madeira operando em área de colheita sem guincho, sendo em média 46% maior que em área de colheita com guincho. A velocidade de deslocamento desta máquina diminuiu com o aumento do aclave e declive, sendo esta redução mais acentuada no sentido do aclave. O uso do SIG permitiu estimar o desempenho da máquina na atividade de extração de madeira em áreas declivosas. A ferramenta também permitiu mapear a velocidade de deslocamento do *forwarder* em função da inclinação do terreno.

Palavras-chave: extração florestal, rendimento operacional, sistemas de informações geográficas (SIG).

## ABSTRACT

Knowing the productivity and behavior of forestry harvesting machines is essential for the proper planning of the operational activities to be carried out in the field. In this sense, the present work had the objective of modeling the productivity and speed of the *forwarder* in the extraction of short logs in inclined areas, as well as to evaluate the use of GIS tool in the forest extraction with *forwarder*.. The research was carried out, between January and June of 2018, in Eucalyptus spp. of a forestry company located in the state of Minas Gerais. The time and motion study was used to evaluate the production process and determine the indexes of operational efficiency, mechanical availability and *forwarder* utilization rate. These parameters, as well as the effective productivity of the machine were evaluated in two conditions, denominated of harvest area without winch (slopes between 0 and 27°) and harvest area with winch (slopes between 27 and 36°). In this research, a method capable of estimating the distance of wood extraction with *forwarder*, such as slope values along the working condition of this machine, was developed, through the available functionalities in the ArcGIS Geographic Information System, allowing to predict operating yield. The results showed that the partial activities that consumed the longest time of the operational cycle of the extraction of wood were the loading and the unloading, in both slopes of the terrain. The productivity of the machine decreased with the increase of the slope of the terrain and the distance of extraction, being this increase more pronounced in relation to the variable distance of extraction. The *forwarder* reached a greater capacity of extraction of wood operating in harvest area without winch, being in average 46% greater than in area of harvest with winch. The speed of travel of this machine decreased with the increase of the slope and slope, this reduction being more accentuated in the direction of the slope. The use of GIS allowed to estimate the performance of the machine in the activity of extraction of wood in sloping areas. The tool also allowed to map the speed of *forwarder* displacement as a function of the slope of the terrain.

Keywords: forest extraction, operating yield, geographic information systems (GIS).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Função exponencial de velocidade de caminhada de Tobler de acordo com inclinação do terreno. ....	30
Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo.....	31
Figura 3 – Desenho esquemático do procedimento operacional do <i>harvester</i> (A), e; Desenho esquemático do procedimento operacional do <i>forwarder</i> (B).....	34
Figura 4 – Foto ilustrativa do <i>Forwarder</i> John Deere, modelo 1910E (A), e; Foto ilustrativa do Guincho de tração auxiliar HAAS (B).....	35
Figura 5 – Distribuição percentual das etapas do ciclo operacional do <i>forwarder</i> nas inclinações do terreno, (A) inclinação 0° a 27°, e (B) inclinação 27° a 36°. ....	48
Figura 6 – Elementos do ciclo operacional do <i>forwarder</i> , em minutos. ....	50
Figura 7 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do <i>forwarder</i> em função da inclinação do terreno e distância de extração, em área de colheita sem guincho.....	54
Figura 8 – Produtividade do <i>forwarder</i> em m <sup>3</sup> /h, em área de colheita sem guincho, em função da inclinação do terreno e da distância de deslocamento.....	54
Figura 9 – Relação entre a produtividade observada do <i>forwarder</i> com a produtividade estimada em área de colheita sem guincho (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para a extração em área de colheita sem guincho (b).....	55
Figura 10 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do <i>forwarder</i> em função da inclinação do terreno e distância de extração em área de colheita com guincho. ....	56
Figura 11 – Produtividade do <i>forwarder</i> , em (m <sup>3</sup> /h), em área de colheita com guincho, em função da inclinação do terreno e da distância de deslocamento.....	56
Figura 12 – Relação entre produtividade observada do <i>forwarder</i> com a produtividade estimada em área de colheita com guincho (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para a extração em área de guincho (b).....	57
Figura 13 – Tendência de comportamento da velocidade do <i>forwarder</i> , em Km/h, em função da inclinação do terreno em aclave e declive, em área de colheita sem guincho. ....	60
Figura 14 – Relação da velocidade observada do <i>forwarder</i> com a velocidade estimada pelo modelo operando em área de colheita sem guincho (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado (b). ....	61
Figura 15 – Mapa de eitos de extração do talhão selecionado com seus respectivos subtalhões (A), e; Classes de DE por subtalhão (B).....	62
Figura 16 – Mapa de inclinação do talhão selecionado (A), e; Classes de inclinações por subtalhão (B). ....	64
Figura 17. Mapa de produtividade do talhão selecionado.....	66

Figura 18 – Mapeamento da velocidade do <i>forwarder</i> em sentido de aclave (A) e declive (B).....	68
Figura 19 – A - Modelo digital de elevação (MDE) do projeto; B – Modelo digital de elevação do talhão extraído do MDE do Projeto, e; C – Modelo digital de elevação de um subtalhão extraído do talhão. ....	79
Figura 20 – Mapa de declividade de um subtalhão. ....	79
Figura 21 – Resultado obtido pela ferramenta “Zonal Statistics as Table”.....	80
Figura 22 – A – Shapefile do Projeto; B – Shapefile do talhão extraído do projeto, e; C – Shapefile do subtalhão extraído do talhão.....	81
Figura 23 – Subtalhão apresentando os eitos teóricos de extração. ....	81
Figura 24 – Valores de comprimento, em metros, dos eitos teóricos de extração relacionados na coluna DE. ....	82
Figura 25 – Resultado obtido pela ferramenta “Summary Statistics”.....	82
Figura 26 – Representação do talhão selecionado apresentando os eitos teóricos de extração.....	83
Figura 27 – Pontos gerados sobre os eitos de extração (A); Detalhe dos pontos distribuídos uniformemente sobre os eitos de extração (B). ....	83
Figura 28 – Mapa de declividade do talhão selecionado.....	84
Figura 29 – Valores de inclinação do terreno no sentido de aclave.....	84
Figura 30 – Valores de inclinação do terreno no sentido de declive.....	85
Figura 31 – Velocidade de deslocamento do <i>forwarder</i> em sentido de aclave e declive. ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativas médias de inventário florestal dos projetos e talhões avaliados.....	32
Tabela 2 – Atividades parciais do ciclo operacional do <i>forwarder</i> .....	37
Tabela 3 – Eficiência operacional, disponibilidade mecânica e taxa de utilização do <i>forwarder</i> .....	51
Tabela 4 – Equações ajustadas para determinação da produtividade do <i>forwarder</i> .....	52
Tabela 5 – Correlação das variáveis influentes na produtividade do <i>forwarder</i> na extração florestal em área de colheita sem guincho e com guincho. ....	53
Tabela 6 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do <i>forwarder</i> operando em área de colheita sem guincho. ....	55
Tabela 7 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do <i>forwarder</i> operando em área de colheita com guincho. ....	57
Tabela 8 – Produtividade estimada, em m <sup>3</sup> /h, para o <i>forwarder</i> em função da inclinação do terreno e distância de extração em área de colheita sem guincho. ....	58
Tabela 9 – Produtividade estimada, em m <sup>3</sup> /h, para o <i>forwarder</i> em função da inclinação do terreno e distância de extração em área de colheita com guincho.....	59
Tabela 10 – Equação de velocidade do <i>forwarder</i> ajustada.....	60
Tabela 11 – Significância dos parâmetros da modelagem da velocidade do <i>forwarder</i> operando em área de colheita sem uso de guincho.....	61
Tabela 12 – Valores de distância de extração obtidos para o talhão selecionado. ....	63
Tabela 13 – Valores de inclinação obtidos para o talhão selecionado. ....	65
Tabela 14 – Valores de Inclinação, DE e Produtividade obtidos para o talhão selecionado.....	67

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivo geral .....	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
3.1. Histórico da mecanização florestal no Brasil.....	18
3.2. Colheita florestal mecanizada .....	19
3.3. Sistemas de colheita florestal.....	20
3.3.1. Sistema de toras curtas ( <i>Cut-to-length</i> ).....	22
3.4. Extração florestal .....	22
3.5. <i>Forwarder</i> .....	23
3.6. Guincho de tração auxiliar .....	24
3.7. Fatores influentes na extração florestal com <i>forwarder</i> .....	25
3.7.1. Distância de extração .....	25
3.7.2. Inclinação do terreno .....	26
3.8. Estudos de tempos e movimentos .....	27
3.9. Planejamento operacional da colheita florestal .....	28
3.10. Função de caminhamento de Tobler.....	29
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
4.1. Local de estudo .....	31
4.2. Coleta dos dados .....	32
4.3. Número de amostras .....	33

4.4. Método de amostragem.....	33
4.5. Caracterização do sistema e método de colheita .....	34
4.6. Máquina avaliada .....	35
4.7. Situações de trabalho .....	36
4.8. Análise técnica .....	36
4.8.1. Produtividade efetiva do <i>forwarder</i> .....	38
4.8.2. Eficiência operacional (EOp) .....	38
4.8.3. Disponibilidade mecânica (DM) .....	39
4.8.4. Taxa de utilização (TU) .....	39
4.9. Análise estatística e construção de modelos .....	39
4.9.1. Modelagem da produtividade .....	39
4.9.2. Modelagem da velocidade de deslocamento do <i>forwarder</i> .....	41
4.10. Elaboração do mapa de produtividade e velocidade do <i>forwarder</i> utilizando SIG .	41
4.10.1. Programa computacional.....	41
4.10.2. Dados de SIG.....	42
4.10.3. Inclinação .....	42
4.10.4. Distância de extração (DE) .....	43
4.10.5. Mapa de produtividade por talhão/subtalhão.....	45
4.10.6. Implementação da velocidade de deslocamento do <i>forwarder</i> em ambiente SIG .	46
 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 48
5.1. Análise técnica .....	48
5.1.1. Estudo de tempos e movimentos .....	48
5.1.2. Eficiência operacional, disponibilidade mecânica e taxa de utilização .....	51
5.2. Modelagem da produtividade do <i>forwarder</i> .....	52
5.2.1. Área de colheita sem guincho.....	53
5.2.2. Área de colheita com guincho .....	55

5.2.3. Influência das variáveis na produtividade.....	57
5.3. Velocidade de deslocamento do <i>forwarder</i> .....	59
5.4. Mapa de produtividade do <i>forwarder</i> .....	62
5.4.1. Distância de extração .....	62
5.4.2. Inclinação .....	63
5.4.3. Mapa de produtividade por talhão/subtalhão .....	65
5.5. Implementação da velocidade de deslocamento do <i>forwarder</i> em ambiente SIG .....	67
6. CONCLUSÕES.....	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
APÊNDICE .....	79
ANEXOS .....	86



## 1. INTRODUÇÃO

Até que chegue ao consumidor como produto derivado (papel, painéis de madeira, etc.), a matéria-prima proveniente das florestas plantadas passa por uma série de processos sucessivos, todos altamente tecnológicos e especializados. Para cada etapa da cadeia produtiva, seja operação em campo, pátio e fábrica, há o uso de máquinas e equipamentos projetados para otimizar os resultados a serem alcançados. Na colheita florestal, quando realizada em ambientes desafiadores, o nível de especialização dessas máquinas e implementos é elevado (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 2017). A mecanização das operações florestais no Brasil iniciou na década de 1970, com a produção de maquinário de porte médio e leve pela indústria nacional (SALMERON, 1981). Entretanto, o grande avanço e modernização da colheita ocorreram na década de 1990, com a importação de máquinas e equipamentos de alta tecnologia, facilitada por políticas de abertura de mercado do Governo Federal (MACHADO et al., 2008a).

O progresso e evolução da mecanização das atividades florestais, especialmente das operações de colheita e transporte de madeira resultou em processos consolidados, cuja eficácia é reconhecida na prática. Quando se trata de colheita, os principais sistemas: Toras Curtas (*Cut-To-Length*) e Toras Longas (*Full Tree*) e máquinas / equipamentos (*harvester, forwarder, feller buncher, skidder*, garra traçadora etc.) não devem ser substituídas no futuro próximo. O que ocorre, na prática, é a melhoria dos processos, a especialização das atividades para maximizar a produtividade e minimizar os custos. Para isso, é necessário a realização de testes e experimentos visando ao máximo o melhor aproveitamento dos sistemas e a utilização das máquinas / equipamentos disponíveis no mercado.

A dificuldade em adquirir terras em locais de maior viabilidade financeira tem obrigado as empresas florestais a procurarem áreas remotas para implantação de florestas, como terrenos acidentados e degradados. Além disso, a competição pelo uso do solo, como para o cultivo de alimentos e bioenergia, está crescendo em todo o mundo. Como resultado o cultivo florestal, muitas vezes, expande para áreas onde tais usos não competem por terra.

Um dos fatores críticos para a colheita florestal é a inclinação do terreno. A ocupação de florestas de produção nestas áreas resultam na necessidade de um eficaz processo de mecanização das operações florestais, a fim de colher e transportar madeira em condições tão extremas. Para tal, existe uma procura crescente por tecnologia especialmente adaptada à

essas condições, exigindo o dimensionamento de máquinas e equipamentos específicos e de alto custo operacional.

O advento de tecnologias como o guincho de tração auxiliar favoreceu a extração florestal mecanizada de madeira em áreas acidentadas. Entretanto, o efeito deste equipamento sobre o rendimento e custo da extração florestal ainda é pouco conhecido. Diante deste cenário, é cada vez mais imprescindível o uso de tecnologias para auxiliar o planejamento das atividades florestais.

As pesquisas relacionadas às variáveis que influenciam a produtividade das operações florestais tornaram-se imprescindíveis, visando a minimização dos custos e otimização dos recursos disponíveis, bem como um eficiente planejamento operacional (SIMÕES e FENNER, 2010). Para Minette et al. (2008), estudar detalhadamente e identificar estas variáveis possibilitam estimar a produtividade, bem como subsidiar o planejamento operacional de atividades florestais.

A modelagem estatística é uma ferramenta capaz de auxiliar a tomada de decisão dos gestores florestais, com vistas à maximização da capacidade produtiva dos equipamentos e redução dos custos. Pois, de acordo com Gonçalves (2017), a possibilidade de prever a produtividade das máquinas de colheita por meio da modelagem das operações, em diferentes condições do terreno e do povoamento, é de fundamental importância para o planejamento florestal.

A exemplo do que ocorre em inúmeras áreas do conhecimento e do desenvolvimento humano, a evolução das tecnologias geoespaciais vem sendo sistematicamente absorvida pelas empresas florestais. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) foram pioneiros na utilização desse recurso para planejamento e gestão das atividades de colheita florestal, disseminando-se em vários setores como planejamento, proteção, inventário, operacional e meio ambiente.

Diante do exposto, cada vez mais torna-se imprescindível a utilização de ferramentas e tecnologias disponíveis no mercado para realização de estudos sobre as variáveis que influenciam a produtividade de máquinas florestais, especialmente em situações adversas de terrenos inclinados. Pois o uso desses recursos possibilita o planejamento adequado das atividades, trazendo agilidade e facilidade na análise e compreensão de problemas específicos das áreas de colheita e transporte florestal.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Modelar a produtividade e velocidade do *forwarder* na extração de toras curtas em diferentes inclinações de terreno, bem como avaliar o uso da ferramenta SIG na operação desta máquina.

### 2.2. Objetivos específicos

- Determinar e avaliar a influência de variáveis que interferem na produtividade do *forwarder*;
- Modelar a produtividade do *forwarder* a partir das variáveis explicativas;
- Determinar o rendimento operacional do *forwarder* nas situações avaliadas;
- Calcular o tempo médio de cada atividade no ciclo operacional do *forwarder*;
- Determinar e modelar a velocidade de deslocamento do *forwarder* em função da inclinação do terreno;
- Avaliar o uso de ferramenta SIG na extração de toras curtas.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. Histórico da mecanização florestal no Brasil

A exploração florestal no Brasil começou em 1940 e desde então foram muitos avanços tecnológicos na colheita mecanizada. O que começou com a colheita da madeira, ainda nativa, sem máquinas; hoje se apresenta em modernos sistemas e equipamentos que compõe as diversas fases da colheita florestal mecanizada.

Apenas no final da década de 50 que surgiu a motosserra, um equipamento importante que deu o pontapé inicial do processo de mecanização da colheita de madeira no Brasil. A motosserra, segundo Moreira (2000), foi a máquina que revolucionou a colheita florestal, uma vez que permitiu avanço tecnológico determinante nas operações de corte florestal.

Nos anos 60 o governo estimulou a plantação de florestas com a política de incentivos fiscais (Lei 5.106), o que demandou aumento da produtividade no campo e, conseqüentemente necessidade de mão de obra especializada. Desde então começaram a aparecer máquinas de pequeno porte, como as motosserras profissionais, os tratores agrícolas, os mini-skidders e os autocarregáveis.

Em 1979 entrou no mercado um protótipo de *forwarder* nacional, produzido pela Engesa e Aracruz Florestal e alguns anos depois surgiram os *feller bunchers* de tesouras e de sabre, que na época eram montados em triciclos.

Segundo Santos (1995), a introdução de máquinas e equipamentos que substituem a motosserra e o machado possibilitou o aumento da produtividade das operações de colheita, minimizando a participação do homem no processo produtivo. De acordo com Fontes (1996), as principais causas da crescente mecanização desta atividade são a busca do aumento da produtividade e a necessidade de redução dos custos de produção.

A partir da década de 1990, a mecanização das operações de colheita e transporte florestal se intensificou no Brasil, com a abertura do mercado brasileiro à importação de máquinas e equipamentos desenvolvidos e aprimorados em países com maior tradição na colheita florestal (BRAMUCCI, 2001).

Com o mercado aberto, começaram a ser importadas máquinas de alta tecnologia, com destaque para as seguintes marcas: Valmet, John Deere, Caterpillar, Komatsu, entre outras.

Os ganhos foram inúmeros, pois estas máquinas permitem trabalho ininterrupto e altas produções (FREITAS, 2005).

As empresas brasileiras de base florestal, ao longo dos anos, têm tido maiores preocupações com a mecanização das operações de colheita florestal, devido a diversos fatores, tais como: o aumento da demanda de madeira e dos custos sociais dos trabalhadores; as buscas por aumento da produtividade; pela escassez da mão de obra e principalmente pela competitividade cada vez mais intensa que obriga a redução de custos (MACHADO et al., 2008a).

### **3.2. Colheita florestal mecanizada**

A colheita florestal é definida como um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal, que visa preparar e levar a madeira até o local de transporte, mediante técnicas e padrões estabelecidos (TANAKA, 1986). Carmo et al. (2015) ressaltam que a colheita compreende as operações de corte e derrubada, processamento e extração da madeira até as margens das estradas.

Esse conjunto de operações representa o ciclo final da produção de uma floresta plantada e vem, ao longo dos anos, ampliando a mecanização em seu processo, para aumento de produtividade e redução de custo de operação, de forma a garantir maior valorização do produto final, tornando-se assim, um dos fatores que definem a rentabilidade florestal (HOFFMANN, 2016; SILVA et al., 2014; NOGUEIRA et al., 2010).

Dentre as atividades florestais a colheita florestal é a operação que gera maior custo à madeira posta na fábrica compreendendo as atividades de corte, extração e carregamento da madeira nos veículos de transporte (SANTOS et al, 2016).

No Brasil, as operações de colheita da madeira nas grandes empresas são normalmente realizadas por métodos mecanizados, com o uso de máquinas de elevada capacidade produtiva (RODRIGUES et al., 2018b). Embora as máquinas florestais sejam eficientes, diversos fatores de ordens técnica, econômica e ambiental podem restringir seu uso (MACHADO et al., 2014; MALINOVSKI et al., 2006).

Atualmente, em razão da quantidade de marcas e modelos existentes para a realização do corte e extração florestal, as empresas utilizam uma variada linha de máquinas e

equipamentos na colheita de madeira, sendo responsabilidade de cada uma optar pelo sistema mais adequado (NASCIMENTO et al., 2011).

A colheita mecanizada é atrativa para as empresas florestais, pois proporciona consideráveis reduções de mão de obra em prazos relativamente curtos, redução de custos, aumento de produtividade e humanização do trabalho, melhorando a qualidade do produto final e podendo, ainda, diminuir o nível de danos ambientais (VIEIRA et al., 2016; PAULA, 2011).

Machado et al. (2014) afirmam que a colheita florestal é uma das operações mais custosas no preço final da madeira na indústria. Por outro lado, Schettino et al. (2015) afirma que existe um cenário de crescente demanda, mão de obra escassa, competitividade e exigências crescentes do mercado e alta mecanização das operações. Dessa forma torna-se fundamental a realização de pesquisas para aumentar o rendimento, produtividade e reduzir custos na atividade de colheita (MONTEIRO et al., 2016).

### **3.3. Sistemas de colheita florestal**

Sistema é definido como conjunto formado por elementos e processos (STÖHR, 1978). É o conjunto de atividades inter-relacionadas entre si que contribuem para um objetivo comum, sendo caracterizado por uma sequência, lugar e objeto de trabalho (MALINOVSKI, 1981). MacDonagh (1994) conceitua os sistemas de colheita como sendo a ligação entre matéria-prima (árvores em pé, na floresta) e as indústrias de transformação da madeira por intermédio do conjunto de operações responsáveis pelo abastecimento das mesmas

A definição e adoção de um sistema de colheita florestal visando perfeita harmonia entre as operações e maquinários utilizados constitui-se, ainda, um grande desafio para empresas de base florestal.

Para Machado e Lopes (2008) a escolha do correto sistema de colheita varia de acordo com diversos fatores, dentre eles topografia do terreno, rendimento volumétrico do povoamento, tipo de floresta, uso final da madeira, máquinas, equipamentos e recursos disponíveis.

Devido à grande diversidade de sistemas de colheita de madeira, sua “implementação” depende da disponibilidade de recursos tecnológicos, financeiros e de qualidade da floresta (MINETTI et al., 2004).

Segundo a FAO (1978), citado por Malinovski (1998), os sistemas de colheita podem ser classificados quanto ao comprimento das toras e à forma como são extraídos do local de processamento. Dessa forma existem basicamente 5 sistemas de colheita, sendo eles:

Sistema de toras curtas (*Cut-to-length*): a árvore é processada no interior do talhão e baldeada até a margem da estrada ou para o pátio temporário em forma de toras com no máximo 6 metros de comprimento;

Sistema de toras longas (*Tree-length*): a árvore é semi-processada no interior do talhão (desgalhamento e destopamento) e em seguida transportada, em forma de fuste e com mais de seis metros de comprimento, até a margem da estrada ou pátio temporário;

Sistema de árvores inteiras (*Full-tree*): a árvore é abatida e arrastada até a margem da estrada ou pátio provisório, onde então será processada;

Sistema de árvores completas (*Whole-tree*): a árvore é arrancada com parte de seu sistema radicular e levada até a beira da estrada ou pátio provisório, onde então será processada;

Sistema de cavaqueamento (*Chipping*): a árvore é abatida e processada no próprio local, sendo levada em forma de cavacos até o pátio de estocagem ou diretamente para a unidade fabril.

Segundo Machado (2014), predominam no Brasil dois sistemas de colheita da madeira: o de toras curtas em empresas cujo produto final é papel e celulose, e; o de árvores inteiras nas empresas produtoras de carvão vegetal.

A escolha de qual sistema utilizar e quais máquinas adquirir exige a realização de estudos detalhados sobre custos e rendimentos, infraestrutura de assistência técnica dos fornecedores e treinamento dos operadores, sendo a escolha mais adequada aquela que venha a atender aos requisitos técnicos, ergonômicos e ambientais.

### 3.3.1. Sistema de toras curtas (*Cut-to-length*)

Neste sistema de colheita as árvores são derrubadas e processadas no interior do talhão, sendo a madeira, em seguida, extraída para a margem do talhão, na forma de toras, com concentração do tráfego das máquinas em carregadores pré-designados no interior do talhão (RODRIGUES e LOPES, 2018a).

Este sistema, quando mecanizado, é caracterizado principalmente pelo uso do *harvester* e do *forwarder*.

O *harvester*, segundo Leite et al. (2013), é constituído de uma máquina base automotriz com rodado de pneus de baixa pressão e alta flutuação, esteiras metálicas ou mistas (pneus com esteiras), lança hidráulica para alcance das árvores que em conjunto com o cabeçote realizam as operações de derrubada, desgalhamento, descascamento, e traçamento da madeira.

Leite (2012) descreve o *forwarder* como um trator florestal transportador, utilizado no processo de extração da madeira do interior do talhão para as margens das estradas, onde são empilhadas ficando prontas para a realização do transporte.

Segundo Malinovski e Malinovski (1998), as principais vantagens do sistema de toras curtas, quando mecanizado, são a facilidade de deslocamento a pequenas distâncias, a baixa agressão ao meio ambiente, principalmente ao solo e a possibilidade da utilização em desbastes. Citam como desvantagem, porém, o fato da não possibilidade de utilização dos galhos, folhas e tocos para energia, polpa e papel, tendo em vista que os mesmos ficam espalhados por todo o talhão, ao invés de ficarem concentrados para facilitar posterior carregamento.

## 3.4. Extração florestal

A extração florestal corresponde à condução da madeira do interior dos talhões para as margens das estradas florestais ou pátios (SIMÕES e FENNER, 2010). De acordo com Seixas e Castro (2014), a atividade de extração de madeira está relacionada à movimentação da madeira desde o local do corte no maciço florestal até a estrada ou pátio intermediário.

A extração da madeira é um dos pontos críticos da colheita, uma vez que o custo de produção por unidade de madeira pode chegar a ser maior que o transporte principal em alguns



países (BIRRO et al., 2002), por exemplo em situações extremas, como extração florestal com uso de helicóptero.

De acordo com Santos (2017), dependendo do modo que for realizada ou do tipo de equipamento a ser utilizado, a operação de extração florestal pode ser nomeada como baldeio, arraste ou suspenso.

Uusitalo (2010) identifica os seguintes modos de extração: arraste ou carregamento manual, arraste animal, arraste com trator de esteiras *bulldozer*, mecanizado com *skidder* e *forwarder*, trator com guincho arrastador, cabos aéreos e helicópteros.

Segundo Lacerda et. al. (2015) a extração de madeira necessita de um planejamento eficiente, pois é uma atividade complexa por causa dos inúmeros fatores que a afetam, quer seja direta ou indiretamente.

Alguns destes fatores foram relacionados por Malinovski et al., (2006) e Lopes et al. (2007), os quais são: as condições do povoamento, topografia do terreno, tipo de solo, condições climáticas, sub-bosque, altura dos tocos, recursos disponíveis e distância de extração.

### **3.5. Forwarder**

Máquina desenvolvida com objetivo de ser utilizada no sistema de toras curtas (Cut-to-length), executa a extração de madeira da área de corte para a margem da estrada ou pátio intermediário.

De acordo com Machado et al. (2014), originalmente fabricados no Canadá e aprimorados na Escandinávia, os *forwarders*, são máquinas, em sua maioria, articuladas, com suspensão da plataforma de carga sobre o chassi traseiro e capacidade de carga variando de 5.000 a 22.000 kg e potência que varia de 95 kW a 205 kW, além de uma grua hidráulica usada no carregamento e descarregamento da própria máquina.

Este mesmo autor complementa ainda que, o uso de tratores florestais de grande versatilidade e capacidade de carga e o desenvolvimento das operações em três turnos de trabalho, como os *forwarders* (cuja função é realizar a extração de madeira), propiciam maior disponibilidade das máquinas para a operação, acarretando em menor custo de produção.

Segundo Jirouek et al. (2007) a eficiência do *forwarder* depende de sua capacidade de carga, assim os *forwarders* de maior capacidade de carga normalmente alcançam custos mais baixos e maiores produtividades por unidade de madeira transportada.

### 3.6. Guincho de tração auxiliar

Áreas acidentadas e condições topográficas desfavoráveis exigem um nível de planejamento ainda mais detalhado, bem como o desenvolvimento de máquinas e equipamentos específicos para a colheita de suas florestas, visando minimizar os custos, diminuir a necessidade de mão de obra não qualificada e aumentar a produtividade para assegurar o abastecimento da indústria (LEITE e LIMA, 2002).

De acordo com Minette (1988) a mecanização de áreas acidentadas exige o uso de equipamentos dimensionados para executarem suas tarefas nestas condições, apresentando custos compatíveis, baixo impacto ambiental e proporcionem boas condições de trabalho ao operador.

Robert (2013) afirma que a extração da madeira em áreas declivosas pode ser realizada com uso de tratores agrícolas com guincho arrastador, sistemas de cabos aéreos, *forwarder* com semiesteiras adaptadas e *skidders*.

Por outro lado, o *forwarder* com guincho de tração auxiliar (GTA) é uma alternativa recentemente introduzida no país, tratando-se da mesma máquina utilizada em áreas planas, porém, adaptada com guincho de tração para uso principalmente em áreas com inclinação acima de 27° (LOPES et al., 2016).

O guincho de tração auxiliar é ancorado em árvores suporte e que permite a redistribuição da potência entre os rodados da máquina, favorecendo, assim, superar os obstáculos sobre o terreno e a trafegabilidade em áreas declivosas, com aumento de sua capacidade de tração.

O uso destes dispositivos permite o *forwarder* realizar com segurança extração em terrenos com até 37° de inclinação (ROBERT et al., 2017).

Segundo Castillo et al. (2014), o uso do Guincho de Tração Auxiliar possibilitou, em alguns casos, que a mecanização da extração florestal passasse dos 60% para 95%. Por sua vez, Brown (2018) afirmou que o *forwarder* equipado com o GTA passou a ser uma alternativa tecnicamente viável para extração de madeira em terrenos com inclinação elevada. Outra tecnologia recém chegada ao Brasil é o *T-winch* com princípio semelhante ao GTA, com a diferença de se tratar de um equipamento independente do *forwarder*.

Estes mecanismos aumentaram significativamente a capacidade de operar em encostas íngremes e evitar danos no solo (VISSER e STAMPFER, 2015). No entanto, não há

informações suficientes para definir todos os principais aspectos dos sistemas de assistência por cabo (MOLOGNI et al. 2016).

### **3.7. Fatores influentes na extração florestal com *forwarder***

A produtividade dos maquinários utilizados nas operações de colheita florestal está diretamente relacionada com diversas variáveis em que estes desenvolvem suas atividades, sendo que as de maior influência são determinadas pelas características do terreno, do povoamento florestal e do planejamento (MALINOVSKI, 1998).

Em um estudo dirigido por Malinovski et al. (2006), concluiu-se que ao todo 37 variáveis podem influenciar diretamente na produtividade das máquinas de colheita de madeira. No estudo os autores concluíram que 20 variáveis relacionadas ao terreno, povoamento e planejamento operacional podem afetar a operação de extração do *forwarder*.

Seixas (2002) destaca que os principais fatores de influência no rendimento operacional de máquinas de extração florestal são: a densidade do talhão, a topografia do terreno, o tipo de solo, o volume das árvores e a distância de transporte.

#### **3.7.1. Distância de extração**

A distância de extração é o percurso compreendido entre a movimentação inicial do *forwarder* em direção ao eito de extração, o deslocamento durante o carregamento, até o momento de parada para descarregamento da madeira.

A produtividade do *forwarder* é altamente relacionada com a distância de extração (CONEGLIAN et al., 2010; CAVALLI et al., 2009; MINETTE et al., 2004). Segundo Seixas (2008) a operação com esta máquina é indicada para distâncias de 200 a 300 metros.

Makkonen (1989), avaliou a produtividade de um *forwarder* Timberjack, modelo 230A, encontrando uma produtividade de extração de madeira de 24 m<sup>3</sup>/h, para uma distância de 360 m, e 31,6 m<sup>3</sup>/h, para uma distância de 170 m, representando queda de 24% na produtividade, comprovando que a distância de extração influencia na produtividade dessa máquina.

Minette et al. (2004), avaliando o *forwarder* da marca Timberjack, modelo 1210B, na extração de madeira de eucalipto, encontraram as produtividades de 35,47 e 40,15 m<sup>3</sup>/h, para distâncias de 122 e 129 m, sendo o corte realizado pelo *feller-buncher* e pelo *slingshot*, com toras de 6 m de comprimento.

Jiroušek et al. (2007) afirmaram que a distância de extração é um fator preponderante nas operações de extração de madeira.

A maximização do carregamento da caixa de carga e otimização da distância de extração são pontos cruciais para garantir a extração em terrenos com topografia desfavorável a um custo viável (TIERNAN et al., 2004).

Para longas distâncias de deslocamento com um *forwarder*, cargas maiores podem reduzir o custo de extração da madeira (AKAY et al., 2004).

### **3.7.2. Inclinação do terreno**

A inclinação do terreno é uma variável que impacta diretamente o rendimento operacional do *forwarder*, sendo muitas vezes fator limitante para operação com este equipamento.

De acordo com Lima e Leite (2008) a inclinação do terreno é uma das variáveis operacionais mais importantes, podendo tornar inviável o tráfego de máquinas no interior da floresta, pois a estabilidade e a segurança ficam comprometidas.

Nas condições de terreno de maior inclinação, maiores são as limitações para o deslocamento das máquinas, aumentando-se assim, como no caso do *forwarder*, o tempo de execução do ciclo de trabalho, por conseguinte, diminuindo a produtividade (AKAY et al., 2004).

Seixas (2008), afirma que o *forwarder*, sem uso de equipamentos de tração auxiliar, tem capacidade de trabalhar em inclinações até 17° no sentido do aclave e 31° no declive. A partir destes valores é inviável o deslocamento desta máquina devido ao alto índice de patinação, gerando redução do rendimento operacional, impactos ao meio ambiente e riscos de acidentes.

### 3.8. Estudos de tempos e movimentos

Dentre as diversas ferramentas administrativas mundialmente difundidas para avaliar o processo produtivo, o estudo dos tempos e movimentos obtiveram maior consagração, sendo bastante utilizado no âmbito das empresas florestais (FERREIRA, 2011).

O estudo de tempos pode ser utilizado para várias finalidades, de acordo com a necessidade do gestor, como, por exemplo, planejar trabalhos, estimar custos, determinar eficiência de máquinas, etc. (MINETTE et. al, 2008).

Este procedimento é o método mais utilizado na medição do trabalho, tendo como objetivo avaliar os fatores que influenciam a eficiência de determinada atividade (ANDRADE, 1998)

Segundo Fenner (2009), o rendimento operacional pode ser determinado por intermédio do estudo de tempos e movimentos do trabalho, cujos objetivos são medir o tempo total e os tempos parciais necessários para realizar determinada tarefa, registrar o resultado do trabalho obtido durante estes tempos (rendimento) e compreender os fatores que exercem influência sobre a atividade que está sendo desenvolvida.

Barnes (1977) define os três métodos básicos para medição do tempo: método de tempo contínuo; método de tempo individual e método de multimomento (amostragem de trabalho).

- Método de tempo contínuo: o cronômetro permanece em movimento durante todo o período do estudo. A leitura é feita ao fim de cada elemento, sendo o tempo do elemento obtido por subtração. É um método útil na identificação do elemento;
- Método de tempo individual: o cronômetro é parado no fim de cada elemento, ocasião em que é feita a leitura, voltando ao zero após a leitura. O tempo do elemento é obtido diretamente;
- Método de multimomento (amostragem do trabalho): neste método, o cronômetro trabalha continuamente. Os tempos dos elementos não são medidos pela frequência com que ocorrem. É necessária a divisão do trabalho em ciclos e elementos. A amostragem é feita em intervalos de tempos previamente fixados, e ao final, o cronometrista observa qual dos elementos está sendo executado e

faz a marcação no formulário. É um bom método para se determinarem a proporção do tempo de trabalho efetivo e as interrupções.

### **3.9. Planejamento operacional da colheita florestal**

O planejamento florestal pode ser definido como a identificação de atividades, bem como a sincronia das mesmas ao longo do tempo, para que seja possível alcançar os objetivos pré-definidos dentro do manejo florestal (SESSIONS e BETTINGER, 2001).

O planejamento eficiente da colheita florestal é essencial para os gestores da área, tendo em vista a otimização sequencial das operações, principalmente quanto à melhoria da qualidade do produto e do serviço, das condições de saúde e segurança dos trabalhadores, à minimização dos impactos ambientais, ao aumento de produtividade e à redução dos custos (MACHADO e LOPES, 2008).

O planejamento em âmbito operacional tem referência nas informações provenientes do planejamento estratégico e tático da empresa, como decisões de colheita dos talhões selecionados para o corte e o tipo de produto a ser gerado da floresta, e retrata as operações que ocorrem em uma escala de tempo diária, semanal ou mensal (DAVIS e JOHNSON, 2000).

O planejamento operacional visa antecipar os problemas e estabelecer rotinas e alternativas operacionais para atingir as metas de produção preestabelecidas (MACHADO e LOPES, 2008b). A alocação de recursos, como máquinas florestais, equipes de trabalho e caminhões, é um exemplo de decisões operacionais abordadas no nível operacional de planejamento (GUNN, 1991).

Oliveira (2009) cita algumas vantagens constatadas com a utilização do planejamento em nível operacional: maior domínio da produção; possibilidade de antecipar possíveis falhas na programação do macroplanejamento, correção de causas de problemas de forma proativa, entre outras.

### 3.10. Função de caminhamento de Tobler

Em grande medida os métodos de análise espacial baseiam-se em dois aspectos principais, nos algoritmos matemáticos, que muitas vezes transcrevem a complexidade matemática num indicador da importância da análise (LONGLEY et al., 2005) e na primeira lei da geografia de Waldo Tobler.

A teoria da Primeira Lei da Geografia, enunciada por Waldo Tobler (TOBLER, 1970), a qual afirma que “Todas as coisas estão relacionadas entre si, no entanto, as coisas mais próximas estão mais relacionadas entre si do que as mais distantes”. O que o levou a concluir que os resultados de análises espaciais dependem da localização dos objetos que estão sendo considerados. Essa máxima está associada ao conceito de autocorrelação espacial que mede o nível de interdependência geográfica entre as variáveis e a natureza e força desse relacionamento (LOPES, 2015).

A Fórmula exponencial (Tobler’s hiking function) calcula a relação entre atributos, tais como: tempo, distância e declive, uma vez que eles estão relacionados entre si (Equação 1).

$$W = 6e^{-3.5\left|\frac{dh}{dx}+0.05\right|}, \text{ em que } \frac{dh}{dx} = S = \tan \theta \quad (1)$$

Onde:

$W$  = velocidade de caminhada (km/h)

$dh$  = diferença de elevação

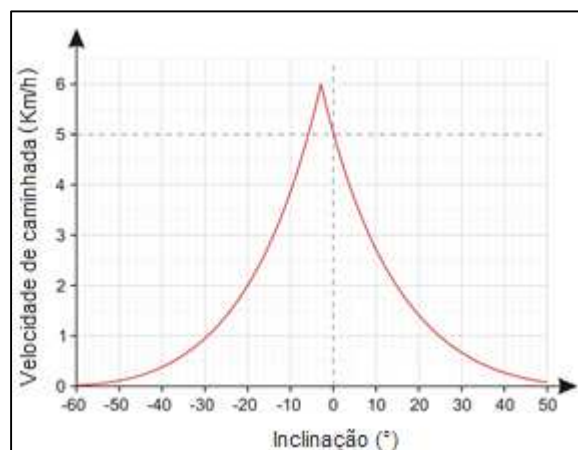
$dx$  = distância

$S$  = declive,

$\theta$  = ângulo de inclinação (inclinação).

A função de velocidade de caminhada de Tobler (Figura 1) determina a velocidade de caminhada, tendo em conta o ângulo do declive e a distância. O efeito que a assimetria na direção do declive detém na velocidade, é marcado com um deslocamento de 0,05 no expoente (TOBLER, 1993).

Figura 1 – Função exponencial de velocidade de caminhada de Tobler de acordo com inclinação do terreno.



Fonte: TOBLER, 1993.

A partir da figura 1 observa-se que a maior velocidade é atingida na inclinação de aproximadamente  $-5^\circ$ . A partir deste valor, em ambos sentidos do terreno, percebe-se redução da velocidade de caminhada, sendo esta diminuição mais acentuada no sentido do aclave. Desta forma a inclinação do terreno pode funcionar tanto como um obstáculo como um componente de apoio, com redução do tempo de caminhada em inclinações descendentes e por outro lado, prolongamento do mesmo em inclinações ascendentes (FIGUEIREDO, 2014).

Esta formula pode ser usada para determinar o mínimo tempo necessário para completar determinado percurso tendo em conta as características topográficas inerentes ou o quão longe pode chegar um meio de transporte, através do conhecimento do tempo em que foi visto pela última vez numa dada posição espacial (MAGYARI-SÁSKA e DOMBAY, 2012).

É importante ressaltar que existem uma infinidade de fatores que influenciam a caminhada e a distância alcançável num determinado período de tempo. Em um contexto geral existem outros fatores de bloqueio como o repouso, a existência de estradas e caminhos, o estado físico e condições do meio de transporte, as condições meteorológicas, a cobertura do solo, entre outros (MAGYARI-SÁSKA e DOMBAY, 2012).

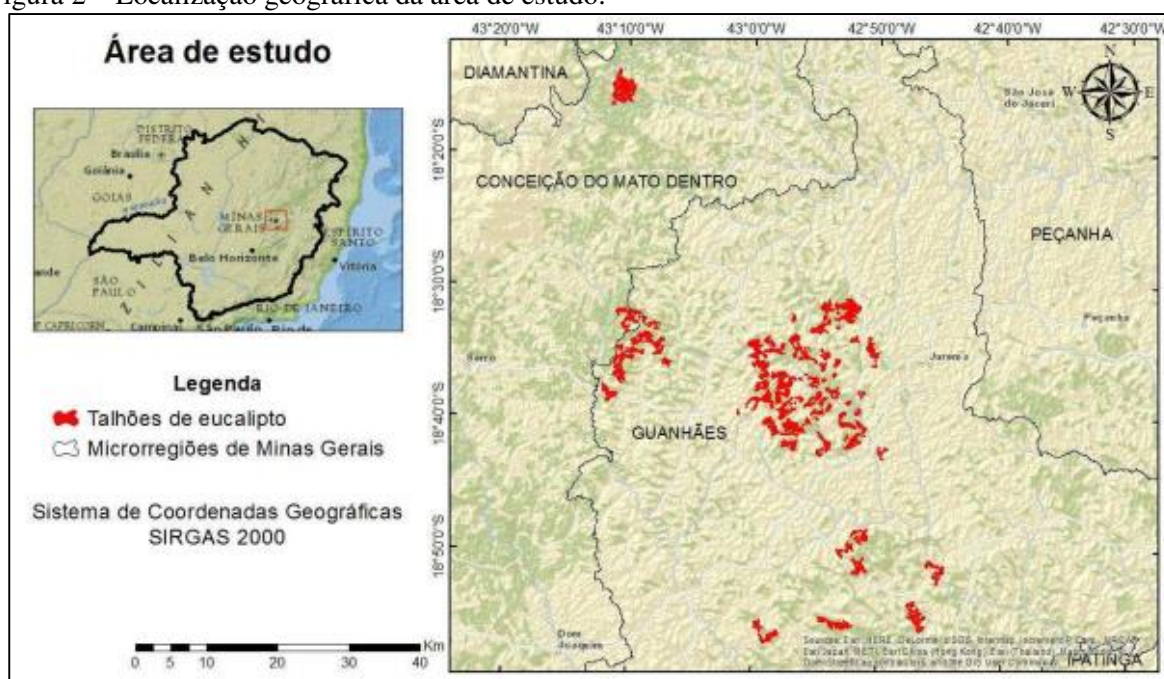


## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Local de estudo

O trabalho foi desenvolvido em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de uma empresa florestal localizada no Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 18° 78' latitude sul e 42° 93' longitude ao oeste, no município de Guanhães (Figura 2).

Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo.



Fonte: Próprio Autor

O clima do município é classificado como tropical de altitude (tipo Cwa segundo Classificação climática de Köppen-Geiger), característica advinda de sua altitude média de 778 metros acima do nível do mar e da latitude de 18,78°S e longitude de 42,93°W; o período de verão registra chuvas e temperaturas elevadas, enquanto o inverno é seco com temperaturas mais baixas. A temperatura é amena durante o ano, variando em média de 15 °C a 30 °C, sendo a média anual de 22,2 °C. A precipitação anual média é de 1212 mm.

A classe textural do solo predominante na região é o Latossolo Vermelho distrófico típico (LV1), textura muito argilosa, A proeminente, relevo classificado como ondulado (FREITAS, 2010).

O estudo foi desenvolvido na regional denominada de Guanhães, englobando os projetos Lagoa Grande I, Germana, Matusalém, Sabinópolis IV e São Pedro.

A Tabela 1 apresenta informações do inventário florestal de cada projeto e talhão onde ocorreram coletas de dados. Avaliaram-se povoamentos em regime de primeira rotação cujo espaçamento de plantio correspondeu a 3,00 metros entre plantas e 3,00 ou 3,33 metros entre fileiras.

Tabela 1 – Estimativas médias de inventário florestal dos projetos e talhões avaliados.

Projeto	Talhão	Área (ha)	DAP (cm)	Altura (m)	VMI (m <sup>3</sup> )	Id. (anos)	IMA	Vol/ ha	VTcc
Germana	A	14,61	16,79	27,68	0,28	6,2	43,55	270,00	3944,70
	B	16,96	19,14	30,35	0,39	6,2	56,73	351,73	5965,34
Matusalém	C	40,47	17,50	24,55	0,28	6,4	33,51	214,49	8680,41
	D	22,97	17,48	23,74	0,26	6,3	33,00	207,90	4775,46
São Pedro	E	25,72	17,74	28,77	0,32	6,3	47,28	297,86	7660,96
	F	14,60	16,72	28,08	0,28	6,3	45,15	284,44	4152,82
	G	10,97	15,58	24,12	0,22	6,3	33,39	210,36	2307,65
	H	25,72	17,39	24,75	0,27	6,3	31,72	199,81	5139,11
Sabinópolis IV	I	40,19	17,95	28,66	0,33	6,1	49,78	303,63	12202,89
	J	18,57	17,20	30,41	0,31	6,0	50,37	302,22	5612,23
Lagoa Grande I	K	51,99	15,33	24,88	0,21	6,0	34,35	206,07	10713,58
	L	59,16	16,10	27,47	0,25	5,9	41,18	242,97	14374,11
	M	49,39	15,27	21,97	0,19	6,1	35,18	214,59	10598,60
	N	47,40	16,19	27,01	0,25	6,0	41,71	250,26	11862,32

DAP = Diâmetro a 1,30 metros do solo; VMI = Volume médio individual; Id. = Idade; IMA = Incremento médio anual (m<sup>3</sup>/ha/ano); Vol/ha = Volume por hectare (m<sup>3</sup>/ha); VTcc = Volume total com casca (m<sup>3</sup>).

#### 4.2. Coleta dos dados

Os trabalhos em campo do módulo de colheita mecanizado foram executados entre os meses de janeiro e julho de 2018, no turno de trabalho das 07:00hs às 16:00hs.

Para cada eito de extração do *forwarder* foram obtidas a inclinação, em graus, e a distância de extração, em metros. A inclinação foi obtida por meio de um clinômetro integrado ao computador de bordo das máquinas avaliadas e, posteriormente, aferida por um clinômetro

digital da marca *HaglöfSweden*. Semelhantemente, a distância de extração foi obtida por meio do odômetro incorporado ao computador de bordo da máquina, sendo esta determinada entre o início do deslocamento vazio e o término do deslocamento carregado.

#### 4.3. Número de amostras

Para o Estudo de Tempos e Movimentos (ETM) o número de ciclos operacionais coletados para cada máquina foi estabelecido com base na metodologia proposta por Barnes (1986).

Inicialmente, realizou-se um estudo piloto com a coleta 10 ciclos operacionais e, a partir desta amostra buscou-se estabelecer o número mínimo de medições, para um erro de amostragem fixado em 5% e 95% de probabilidade, obtido por meio da equação 2:

$$n \geq \frac{t^2 CV^2}{\epsilon^2} \quad (2)$$

onde,

n = número mínimo de ciclos;

t = nível de probabilidade desejado a (n-1) graus de liberdade;

CV = coeficiente de variação (%); e

ε = erro admissível (%).

#### 4.4. Método de amostragem

Na coleta de dados para o cálculo da produtividade do *forwarder* foi empregada a amostragem seletiva considerando diferentes inclinações e distancias de extração. Este método foi adotado com objetivo de garantir maior representatividade dos dados, bem como abranger uma maior variação dos mesmos.

Com base nas variáveis de estudo e, juntamente com a equipe de técnicos da empresa, foram selecionados através da análise dos mapas dos projetos, talhões com as características desejadas.

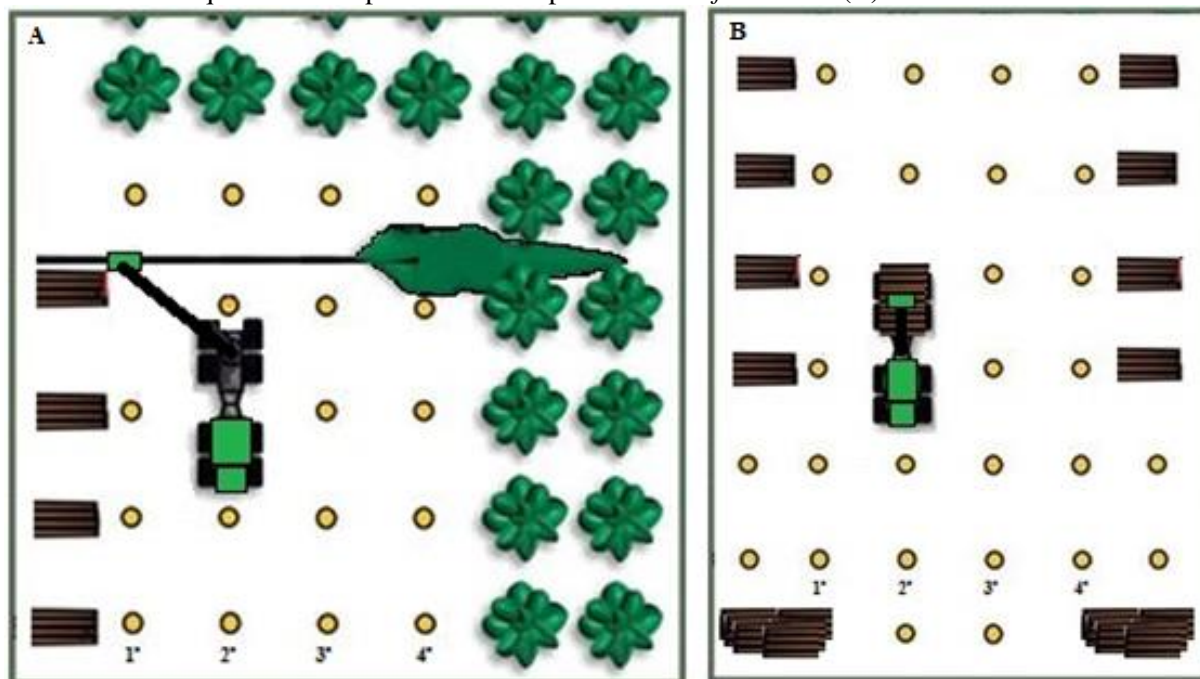
#### 4.5. Caracterização do sistema e método de colheita

O sistema de colheita adotado na empresa é o de toras curtas (cut-to-length), com traçamento do tamanho das toras em torno de 6 metros. Adoção do método mecanizado, com o corte e processamento das árvores realizados pelo *harvester* e extração da madeira pelo *forwarder*.

O eito de derrubada de árvores é o de quatro linhas, sendo o deslocamento das máquinas feito no sentido ascendente ou descendente do relevo, ou seja, perpendicularmente às curvas de nível. Na faixa de corte do *harvester* adotada pela empresa a máquina trafega na 2ª linha de plantio, realizando o empilhamento dos toretes à esquerda do eito de corte (Figura 3A).

A extração da madeira do interior do talhão para suas margens ocorreu por intermédio do baldeio, na qual a madeira não entra em contato com o solo devido ao compartimento de carga suspenso da máquina. Utilizou-se nesta etapa o trator florestal autocarregável *forwarder*, sendo a madeira carregada no interior do talhão, deslocada e empilhada na margem da estrada para o posterior transporte (Figura 3B).

Figura 3 – Desenho esquemático do procedimento operacional do *harvester* (A), e; Desenho esquemático do procedimento operacional do *forwarder* (B).



Fonte: Próprio Autor

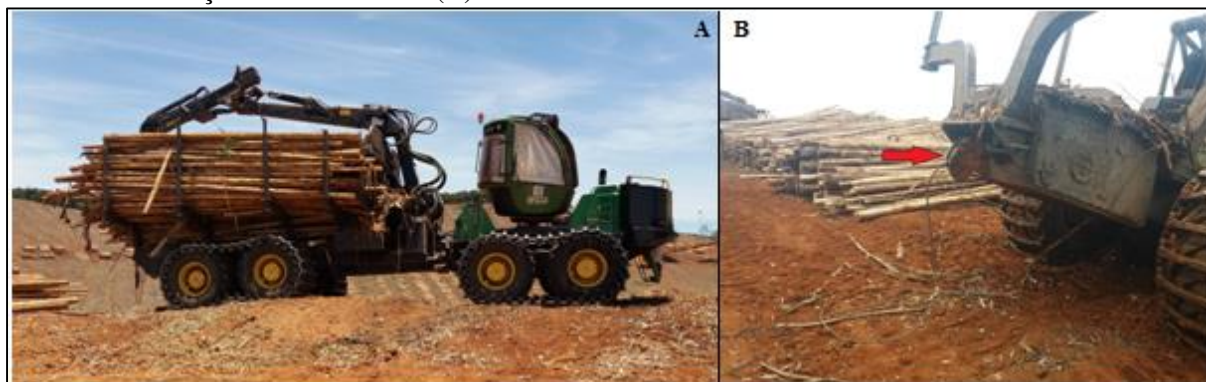
#### 4.6. Máquina avaliada

O *forwarder* avaliado no estudo é da marca John Deere, modelo 1910E (Figura 4A), equipado com cabine giratória com autonivelamento, motor John Deere PowerTech™ Plus 6090 a diesel com potência de 249 hp. A máquina tem 10,37 metros de comprimento e 3,09 metros de largura, com peso operacional de 21.800 kg e capacidade de carga de 19 toneladas.

O *forwarder* é equipado com uma grua hidráulica modelo CF 885, com alcance máximo de 8,5 metros e, ângulo de ataque de 42°. Sua operação é realizada pelo operador na cabine por intermédio de *joysticks* e botões existentes no painel. A máquina possui sistema de rodado misto, constituído de pneus BPAF (baixa pressão e alta flutuação) e semiesteiras. Possui tração 8x8 de 220kN, com velocidade de deslocamento variando de 0 a 21 km/h.

Para trabalhar em inclinações superiores a 27° os *forwarders* são equipados com guincho de tração auxiliar da marca HAAS fixado no chassi, sincronizado com o sistema de transmissão, peso operacional de 1.500 Kg e, capacidade de tração de 9 toneladas (Figura 4B). Este equipamento pode estar equipado com dois tipos de cabo de aço, sendo um de 15 mm e 300 metros de comprimento, ou de 14 mm e 350 metros, ambos com resistência a tração de 200 kN (20 toneladas). Os comandos do guincho encontram-se na cabine da máquina e são acionados por meio de controle remoto.

Figura 4 – Foto ilustrativa do *Forwarder* John Deere, modelo 1910E (A), e; Foto ilustrativa do Guincho de tração auxiliar HAAS (B).



Fonte: Próprio Autor

#### 4.7. Situações de trabalho

Em função da inclinação do terreno, a colheita florestal da empresa é realizada considerando três modalidades:

- Colheita sem guincho: são áreas com inclinação entre 0° e 27° onde o *harvester* e *forwarder* operam sem auxílio do guincho de tração auxiliar.
- Colheita com guincho: são áreas com inclinação entre 27° e 36°, onde o *harvester* ou *forwarder* operam com auxílio de um guincho de tração auxiliar. O objetivo do guincho é melhorar a tração da máquina, evitando a patinação dos pneus e permitindo que os mesmos ultrapassem obstáculos presentes no solo.
- Colheita especial: são áreas com inclinação acima de 36°, onde o corte é realizado com motosserra e a extração efetuada com trator agrícola equipado com guincho TMO.

As áreas avaliadas nesta pesquisa contemplou somente talhões relacionados com os dois primeiros níveis de inclinação / modalidades de colheita. As áreas foram classificadas a partir de mapas de microplanejamento utilizados pela empresa e, aferidos em campo com auxílio de um clinômetro digital.

#### 4.8. Análise técnica

Consistiu em um Estudo de Tempos e Movimentos (ETM) conforme metodologia descrita por Barnes (1997), objetivando medir os tempos parciais e o tempo total necessários para realização de determinada tarefa / atividade, com o intuito de se determinar o resultado (rendimento) do trabalho obtido durante os tempos mensurados e, compreender os fatores que exercem influência sobre a atividade desenvolvida.

Com o ETM obteve-se o rendimento operacional do *forwarder* em diferentes condições de inclinação do terreno e distâncias de extração.

Na realização do ETM utilizou-se o método do tempo contínuo, no qual a medição é ininterrupta (sem retenção do cronômetro). Nesse sentido, o pesquisador faz a leitura do cronômetro cada vez que ocorre um ponto de medição. O tempo de cada atividade parcial é obtido por subtração entre a hora que terminou a atividade parcial em questão e, a hora em que

esta iniciou-se (STOHR e LEINERT, 1978). A utilização desse método foi devido ao maior tempo de duração dos elementos que compõem o ciclo operacional do *forwarder* e, também, tomando por base trabalhos semelhantes desenvolvidos na área (SIMÕES e FENNER, 2010; OLIVEIRA et al., 2009; MINETTE et al., 2004).

As atividades parciais do ciclo operacional do *forwarder* são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Atividades parciais do ciclo operacional do *forwarder*.

Elementos	Descrição
Deslocamento sem carga	Tempo de movimentação da máquina com o compartimento de carga vazio, iniciando na margem da estrada até início do carregamento.
Carregamento	Tempo de movimentação da grua para recolher a madeira no talhão e a ação de carregar o compartimento de carga, finalizando com a carga completa e posicionamento da grua sobre as toras.
Deslocamento com carga	Tempo de movimentação da máquina carregada de dentro do talhão até a margem da estrada, finalizando com o posicionamento desta para descarregamento.
Descarregamento	Tempo de movimentação da grua retirando as toras do compartimento de carga e empilhando estas na margem da estrada, finalizando com o posicionamento deste implemento sobre a caixa de carga vazia.
Instalação do guincho	Tempo de parada da máquina e instalação do guincho de tração auxiliar, terminando com o retorno do deslocamento da máquina.
Desinstalação do guincho	Tempo com a parada da máquina e desinstalação do guincho, finalizando com o início de movimentação do <i>forwarder</i> .
Interrupções	Tempos relacionados a fatores operacionais ou não operacionais, tais como: parada para alimentação, hidratação, manutenção corretiva, manutenção preventiva, abastecimento da máquina, chuva, necessidades pessoais, entre outros.

Na realização do estudo de tempos e movimentos foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos: formulários específicos (anexo), prancheta e cronômetro sexagesimal.

#### 4.8.1. Produtividade efetiva do *forwarder* (Pef)

Corresponde ao volume de madeira em metros cúbicos, sem casca, extraída do talhão até a margem da estrada por hora efetiva de trabalho. Na regional de Guanhães, o volume médio de madeira transportada pelo *forwarder* por ciclo operacional é de 15,0 m³. Este valor foi definido por estimativas realizadas pela empresa com base nos dados de volume médio individual proveniente do inventário florestal e cubagem de pilhas. O teste ocorreu sempre utilizando o máximo volume possível de carga a ser transportada.

Mediante acompanhamento da operação em campo determinou-se o tempo efetivo de cada ciclo operacional da máquina. A produtividade foi obtida por intermédio da equação 3:

$$Pef = \frac{Vol}{Tef} \quad (3)$$

Em que:

Pef = produtividade efetiva (m³/h);

Vol = volume de madeira no compartimento de caixa (m³);

Tef = tempo efetivo de trabalho (horas).

#### 4.8.2. Eficiência operacional (EOp)

Corresponde a porcentagem do tempo efetivamente trabalhado, em relação ao tempo total programado para o trabalho. Determinada pela equação 4 (BIRRO et al., 2002):

$$EOp = \frac{he}{he+hp} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

EOp = Eficiência operacional (%);

he = horas efetivas de trabalho (horas); e

hp = horas paradas (horas).



#### 4.8.3. Disponibilidade mecânica (DM)

Corresponde à relação entre o tempo de trabalho programado e o tempo em que a máquina está apta a realizar trabalho produtivo. Portanto, desconsidera-se o tempo em que a máquina permanece em manutenção (LEITE et al., 2012). Esta foi determinada pela equação 5:

$$DM = \frac{HT-TM}{HT} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

DM = disponibilidade mecânica (%);

HT = horas programadas para trabalho (horas); e

TM = tempo de permanência em manutenção (horas).

#### 4.8.4. Taxa de utilização (TU)

Corresponde a relação entre eficiência operacional e disponibilidade mecânica, sendo determinada pela equação 6:

$$TU = EOp \times DM \quad (6)$$

Onde:

TU = taxa de utilização (%);

EOp = Eficiência operacional (%); e

DM = Disponibilidade mecânica (%).

### 4.9. Análise estatística e construção de modelos

#### 4.9.1. Modelagem da produtividade

Os dados foram inicialmente submetidos à análise exploratória por meio de gráficos de dispersão. Em sequência, foi realizada análise de regressão linear, para estimativa da produtividade da máquina em função da distância de extração e inclinação do terreno.

Os modelos de regressão linear múltipla procuram prever uma variável dependente  $Y$ , assumindo sua relação linear com mais de uma variável independente, ou seja, inúmeras variáveis independentes  $k$  cujo modelo da  $i$ -ésima observação pode ser expressa como:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Em que:

$Y_i$  = representa o valor da variável dependente

$X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{ik}$  = são os valores da  $i$ -ésima das  $p$  variáveis explicativas (constantes conhecidas)

$\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k$  = parâmetros do modelo

$\epsilon_i$  = corresponde aos erros aleatórios.

O modelo ajustado proporcionou a construção de gráficos de contorno, em que as variáveis explicativas são representadas nos eixos cartesianos ( $x$  e  $y$ ) e os valores de produtividade das máquinas são representados por linhas de níveis na região interna do gráfico.

O grau de associação entre as variáveis do modelo foi obtido por meio da análise da matriz de coeficiente de correlação ( $r$ ) de Pearson, pelo teste  $t$  a 95% de probabilidade.

Antes do ajuste foram feitas análises para detecção e exclusão de *outliers* com auxílio de gráficos de dispersão.

Os valores das variáveis foram submetidas ao teste de normalidade de *Lilliefors* para verificação da normalidade dos dados, e, então, havendo significância, procedeu-se com as análises subsequentes.

Posteriormente, para analisar a qualidade do modelo ajustado foram utilizadas as estatísticas:

- a) Coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ );
- b) Erro padrão da estimativa em porcentagem ( $Syx$  (%));
- c) análise gráfica: produtividade do *forwarder* observado *versus* estimado.

As análises foram processadas utilizando-se o *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018).

#### 4.9.2. Modelagem da velocidade de deslocamento do *forwarder*

A velocidade alcançada pelo *forwarder* é influenciada pela inclinação do terreno e pelo sentido de deslocamento no eito de extração, ou seja, em declive ou aclave. Desta forma, adotando a teoria de Tobler (1993) estimou-se uma equação que determina a velocidade de deslocamento do *forwarder*, levando em consideração o ângulo de inclinação do terreno.

A velocidade de deslocamento do *forwarder* foi obtida por intermédio da equação 7:

$$V = \frac{D}{T} \quad (7)$$

Em que:

V = velocidade de deslocamento do *forwarder* (Km/h);

D = distância percorrida no eito de extração (Km);

T= tempo gasto no deslocamento no eito de extração (h).

#### 4.10. Elaboração do mapa de produtividade e velocidade do *forwarder* utilizando SIG

##### 4.10.1. Programa computacional

Utilizou-se o *software* ArcGIS (de propriedade da empresa) versão 10.5 (ESRI 2016), que é um sistema de informação geográfica (*Geographic Information System – GIS*) utilizado para gerenciar, compartilhar e analisar dados espaciais. O sistema fornece uma infra-estrutura que permite a criação e utilização de mapas; compilar dados geográficos; análise de informações mapeadas; compartilhar informações geográficas; usar mapas e informações geográficas em uma gama de aplicações, e; gestão de informação geográficas numa base de dados.

#### 4.10.2. Dados de SIG

A base de dados fornecida pela empresa para desenvolvimento desta etapa foram nuvens de pontos *LiDAR* (*Light Detection And Ranging*), e arquivos *shapefiles* de microplanejamento dos talhões avaliados.

O levantamento com o sensor *LiDAR* na região foi realizado entre os meses de abril e maio de 2014. O sensor foi acoplado à uma aeronave Cessna Modelo 206.

Os retornos do *laser* (pontos da nuvem) foram classificados em terreno e não terreno e, posteriormente, interpolados para criação dos modelos digitais de terreno e superfície, respectivamente, ambos com resolução espacial de 0,5 m.

É importante salientar que para realizar o microplanejamento das atividades operacionais de campo, a empresa subdivide um talhão em subunidades, ou seja, em parte menores. Neste trabalho estas subunidades foram denominadas de subtalhões. Desta forma, objetivando garantir maior precisão dos resultados, as análises espaciais foram realizadas seguindo esta mesma premissa, sendo que os resultados podem ser extrapolados para o nível de talhão ou de projeto.

Para exemplificar as etapas e procedimentos executados para cálculo da inclinação e distância de extração foi escolhido aleatoriamente um talhão dentre os diversos projetos avaliados. Sendo que o mesmo não apresenta todas as inclinações e distâncias obtidas no presente trabalho.

No apêndice encontram-se figuras ilustrativas de todos passos e etapas executadas no software ArcGIS para obter as variáveis inclinação e distância de extração, bem como elaboração do mapa de velocidade de deslocamento do *forwarder*.

#### 4.10.3. Inclinação

Uma variável importante que influencia diretamente no deslocamento do *forwarder* é a inclinação do terreno. Para obtenção desta informação foi utilizado um modelo digital de elevação (MDE) derivado de dados *LiDAR*, representado no formato *raster* com resolução espacial de 0,5 m.

Objetivando obter um MDE com extensão apropriada para rodar no ArcGIS realizou-se o pré-processamento dos dados LiDAR por meio do *software* FUSION (MCGAUGHEY, 2018) e do *prompt* de comando (linguagem DOS) do Windows.

O *software* FUSION foi originalmente desenvolvido para ajudar os pesquisadores a entender, explorar e analisar dados LiDAR. Os grandes conjuntos de dados comumente produzidos por levantamentos LiDAR não podem ser usados diretamente em ambientes SIG comerciais ou de processamento de imagens sem um pré-processamento extensivo.

O passo seguinte foi obter um MDE para cada talhão separadamente, uma vez que os dados LiDAR fornecidos pela empresa englobava a extensão total do projeto florestal.

Com o MDE do projeto inserido na interface do ArcGIS utilizou-se a ferramenta “Clip”, para destacar apenas o MDE relativo ao talhão de interesse. Para tanto utilizou-se como camada máscara o *shapefile* referente ao polígono do talhão correspondente. Posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado para obter o *raster* do subtalhão.

Em sequência, para se obter o mapa de inclinação do subtalhão selecionado, utilizou-se a ferramenta “Slope” disponível na caixa de ferramentas “Spatial Analyst”.

Ao final deste processo obteve-se o mapa de inclinação do subtalhão. Para facilitar a visualização e sua interpretação, o mapa gerado foi personalizado em escalas de cores de acordo com as classes de inclinações obtidas em campo.

Por fim, foi utilizada a ferramenta “Zonal Statistics as Table”, a qual forneceu variáveis estatísticas como, o valor máximo, médio e mínimo a partir da camada de inclinação do respectivo subtalhão.

#### **4.10.4. Distância de extração (DE)**

Para o cálculo da distância de extração desenvolveu-se uma sequência de comandos no ArcGIS 10.5, utilizando-se diversos recursos *vector* disponíveis nesta versão do programa.

Neste caso, a DE tem que ser calculada de acordo com o mapa de microplanejamento de extração de madeira, pois na elaboração do mesmo são considerados fatores importantes como direção de saída e local de deposição da madeira baldeada, bem como a rede de estradas que circunda o talhão.

Ressalta-se que a DE é diferente para cada subtalhão pelo fato destes possuírem tamanhos e formas geométricas diferentes. Sendo assim, o primeiro passo foi separar um único

subtalhão do talhão completo e, criar um novo mapa somente com o subtalhão selecionado. Este procedimento foi repetido sucessivamente até separar todos subtalhões de cada talhão. Para realizar esta operação utilizou-se o comando “Export Data...” selecionando apenas a camada de interesse e ativando a opção “selected features”. Este procedimento foi realizado para extrair o talhão do projeto e, posteriormente, o subtalhão do talhão. O comando executado seleciona objetos vector (pontos, linhas, centroides, bordaduras e áreas) de um mapa vector e cria um novo mapa contendo somente o objeto selecionado.

### **Eitos teóricos de extração**

Vale ressaltar que os talhões dos projetos avaliados possuem espaçamento com formato aproximadamente quadrangular (3,00x3,00m ou 3,00x3,33m). Desta forma, o sentido de alinhamento do plantio não influencia o deslocamento do *forwarder*. Porém, o fato destes talhões estarem localizados, na maioria das vezes, em regiões declivosas, o sentido de deslocamento da máquina, por uma questão de segurança, era sempre realizado em aclave ou declive. Já em locais mais planos a definição do sentido de deslocamento da máquina é feita de acordo com o planejamento operacional realizado pelos técnicos da empresa. A partir destas premissas, os mapas de microplanejamento apresentam elementos georreferenciados (em formas de setas) para indicar o sentido de saída da madeira.

Para geração dos eitos de extração a intenção foi traçar linhas paralelas com equidistância de 13 metros, equivalente à distância obtida em campo, entre os eitos de deslocamento do *forwarder*. Utilizou-se a ferramenta “Create Fishnet” para inserir linhas paralelas com espaçamento de 13 metros sobre a camada subtalhão.

Em sequência, utilizou-se a ferramenta “Rotate Tools”, disponível no modo de edição do programa, para rotacionar a camada de linhas paralelas e orientá-la na mesma direção de saída da madeira.

Posteriormente, utilizou-se o comando “Clip” para recortar a feição gerada, selecionando como camada máscara o polígono do subtalhão, pois a camada de linhas também englobava regiões fora da área desejada e, a intenção era somente a área interna. Neste sentido, o uso da “máscara” permitiu selecionar apenas a área do subtalhão selecionado.

Após a realização destes passos obteve-se “eitos teóricos de extração”, ou seja, uma camada com linhas paralelas ajustadas à grelha do subtalhão com parâmetros de comprimento, equidistância e direção de saída da madeira, próximos aos dados obtidos diretamente em campo.

O passo seguinte foi calcular o comprimento dos “eitos teóricos de extração” para obtenção da DE. Para isto, utilizou-se a ferramenta “Add Surface Information” disponível em “3D Analyst Tools” usando com camada de superfície o MDE do talhão correspondente. Esta ferramenta calcula a distância real ou tridimensional entre feições sobre uma superfície 3D.

O resultado deste procedimento foi a criação de um novo campo na tabela de atributos com os valores de comprimento (real) de cada eito de extração gerado.

Por fim, utilizou-se a ferramenta “Summary Statistics”, a qual forneceu variáveis estatísticas sobre o cálculo realizado, como as distâncias mínima, média e máxima, a partir do campo DE criado na tabela de atributos da camada eitos de extração.

#### **4.10.5. Mapa de produtividade por talhão/subtalhão**

A produtividade das máquinas de colheita florestal é uma das principais variáveis que podem viabilizar ou não a retirada de madeira dos povoamentos florestais. Sua adequada predição é de suma importância para que sejam realizados orçamentos adequados pelas empresas (MALINOVSKI et al., 2006).

A distância de extração e a topografia constituem variáveis importantes que interferem no rendimento e custos da extração florestal, pois à medida que a inclinação do terreno e a distância de extração aumentam, maior será o tempo da atividade de extração realizada pelo *forwarder* e, conseqüentemente, menor será sua produtividade.

Nas rotinas baseadas em análises espaciais realizadas nos itens 4.10.3 e 4.10.4 foram gerados para cada talhão/subtalhão um *raster* com os valores de inclinação do terreno e, um vetor com valores de distância média dos eitos de extração.

Para estimar a produtividade do *forwarder* por meio do modelo ajustado organizou-se uma planilha eletrônica com as variáveis calculadas que podem interferir no rendimento da extração florestal mecanizada.

Por fim, utilizou-se a equação ajustada para se determinar os valores de produtividade estimada e, a partir dos mapas de inclinação e distância de extração gerados em ambiente SIG confeccionou-se um mapa de produtividade do *forwarder* para o subtalhão/talhão florestal.

#### 4.10.6. Implementação da velocidade de deslocamento do *forwarder* em ambiente SIG

Os dados espaciais utilizados nesta etapa foram: o modelo digital de elevação (MDE) do talhão selecionado e os arquivos *shapefiles* gerados no item 4.10.4.

A função de deslocamento ajustada foi implementada apenas para os eitos de extração estimados no item 4.10.4, pois, partiu-se da premissa que o *forwarder* desloca exclusivamente sob os eitos de extração feitos pelo *harvester*, durante a etapa de corte e processamento da madeira.

A inclinação sofre alterações ao longo do terreno e, desta forma, torna-se essencial estimar a velocidade desta máquina em vários pontos do eito de extração.

Sendo assim, inicialmente foi necessário gerar pontos equidistantes sob as linhas que representam os eitos de extração do *forwarder*. Para isso, o arquivo *shapefile* contendo os eitos de extração gerados no item 4.10.4 foi carregado no *Data Frame* do ArcGIS.

Utilizou-se a ferramenta “Generate Points Along Lines” para gerar pontos a cada três (3) metros ao longo de cada eito de extração. Este valor foi utilizado, pois espera-se que a velocidade do *forwarder* não tenha uma variação significativa em uma distância relativamente curta.

Como resultado, foi gerada uma camada vetorial do tipo “*ponto*”, onde cada um está situado a exatamente 3 metros de distância dos pontos adjacentes.

Como a velocidade do *forwarder* varia em função da inclinação, tornou-se necessário obter a informação de inclinação do local onde está situado cada ponto gerado sobre o eito de extração desta máquina. Sendo assim, o próximo passo foi acessar o mapa de inclinação do talhão gerado no item 4.10.3.

Em seguida, utilizou-se a ferramenta “Extract Multi Value to Points”, para obter os valores de inclinação do mapa de inclinação e armazená-los na tabela de atributos da camada de pontos localizados sobre o eito de extração.

Como resultado, gerou-se na tabela de atributos da camada de pontos, os valores de inclinação de cada ponto individualizado.

Como os valores obtidos são positivos, estes se referem ao sentido de aclave. Sendo assim, foi necessário gerar valores negativos em referência ao sentido de declive. Nesta etapa utilizou-se a ferramenta “Field Calculator” disponível na tabela de atributos de arquivos do tipo vetor.



Ao final deste processo, calculou-se a inclinação em valores decimais para ambos os sentidos a percorrer, ou seja, aclive e declive, sendo as respectivas inclinações exatamente o inverso aditivo uma da outra. Este passo foi necessário, pois a variação de velocidade de deslocamento do *forwarder* não é a mesma no sentido de aclive e declive.

Ao percorrer caminhos declivosos, a inclinação do relevo (declive ou aclive) afeta diretamente a velocidade do *forwarder*. Para se estimar a velocidade de deslocamento desta máquina em função da inclinação do percurso, foi adotada a equação ajustada no item 4.9.2.

Para tanto, utilizou-se a função condicional “If” no “Field calculator”. A função foi necessária, pois a equação de velocidade do *forwarder* foi ajustada apenas para área de colheita sem guincho, uma vez que em área de colheita sem guincho a velocidade do *forwarder* mantém-se praticamente constante. Desta forma, a equação foi aplicada apenas para aclives ou declives entre -27 e 27°. Para aclives entre 27 e 36° e declives entre -27 e -36° a função foi configurada para retornar o valor constante de 1,30 Km/h, refletindo a média de velocidade, aproximada, observada em área de colheita com guincho.

Desta forma, calculou-se a velocidade atingida pelo *forwarder* ao longo do eito de extração, em cada um dos sentidos (aclive e declive), armazenando os resultados na tabela de atributos da camada de pontos. Foi possível assim, mapear a velocidade atingida pelo *forwarder* ao longo do eito de extração de madeira.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

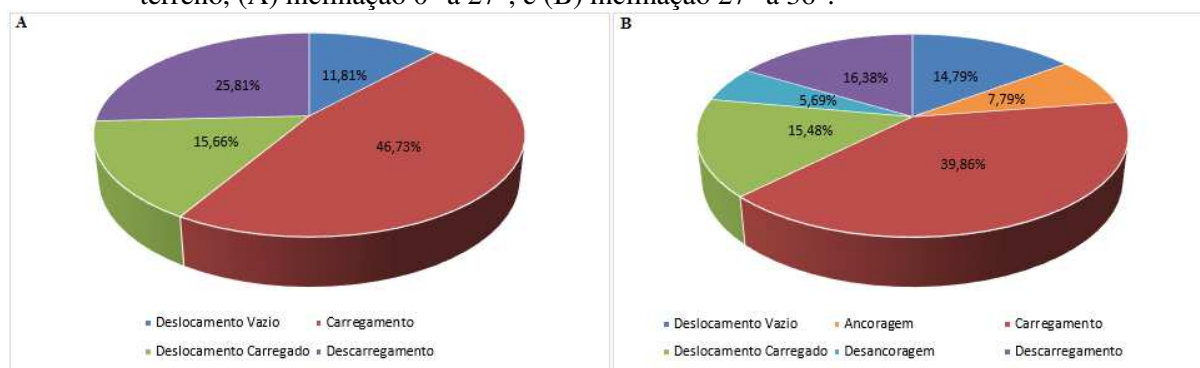
### 5.1. Análise técnica

#### 5.1.1. Estudo de tempos e movimentos

A Figura 5 apresenta os resultados do estudo de tempos e movimentos do ciclo operacional do *forwarder* nas inclinações estudadas.

Na inclinação de 0 a 27° foram coletados 123 ciclos operacionais e, 77 ciclos na inclinação de 27 a 36°, quantidades de ciclos estes que atenderam ao número mínimo estabelecidos no estudo piloto, que foi de 106 e 52 observações respectivamente, para as duas situações estudadas.

Figura 5 – Distribuição percentual das etapas do ciclo operacional do *forwarder* nas inclinações do terreno, (A) inclinação 0° a 27°, e (B) inclinação 27° a 36°.



Fonte: Próprio Autor

Verifica-se que o carregamento e o descarregamento da madeira foram as atividades parciais responsáveis pelo consumo da maior parte do tempo total do ciclo operacional (46,73 e 25,81% respectivamente) na inclinação de 0 a 27° e, na inclinação de 27 a 36° (39,86 e 16,38% respectivamente). Estas atividades representaram juntas em média, 72,54 e 56,24%, do tempo total efetivamente trabalhado, para área de colheita sem guincho e com guincho, respectivamente.

Tais resultados devem-se ao fato de que, conforme Seixas (2008), o *forwarder* passa a maior parte do tempo de seu ciclo operacional de forma passiva, realizando as atividades de carregamento ou descarregamento da madeira.

Os resultados obtidos correspondem também aos relatos da literatura (SEIXAS e CASTRO, 2014; CONEGLIAN et al., 2010; SIMÕES e FENNER, 2010, e; MINETTE et al., 2004), que encontraram em seus estudos com *forwarder*, os maiores percentuais de tempo do ciclo operacional gastos nas atividades de carregamento e descarregamento, em diferentes subsistemas de colheita da madeira.

A fim de propiciar redução / otimização dos tempos de carregamento e descarregamento e, conseqüentemente, aumento da eficiência operacional do *forwarder* na extração de madeira, Oliveira et al. (2009) sugerem as seguintes ações: melhor treinamento dos operadores, uso de gruas hidráulicas de maior alcance, garras apropriadas às características da madeira e planejamento mais eficiente das operações, como a formação de pilhas de toras de volumes que se aproximam à capacidade da garra ou múltiplos dessa capacidade. A adoção de tais medidas poderá propiciar redução dos tempos de carregamento e descarregamento e, conseqüentemente, aumento da eficiência operacional da máquina na extração florestal.

Por sua vez, as atividades “deslocamento vazio e deslocamento carregado” consumiram o segundo maior tempo do ciclo operacional nas duas situações avaliadas, representando 11,81 e 15,66% em área de colheita sem guincho e, 14,79 e 15,48% em área de colheita com guincho, respectivamente. Estas atividades são principalmente influenciadas pela distância de extração e pela velocidade de deslocamento do *forwarder* no eito de extração.

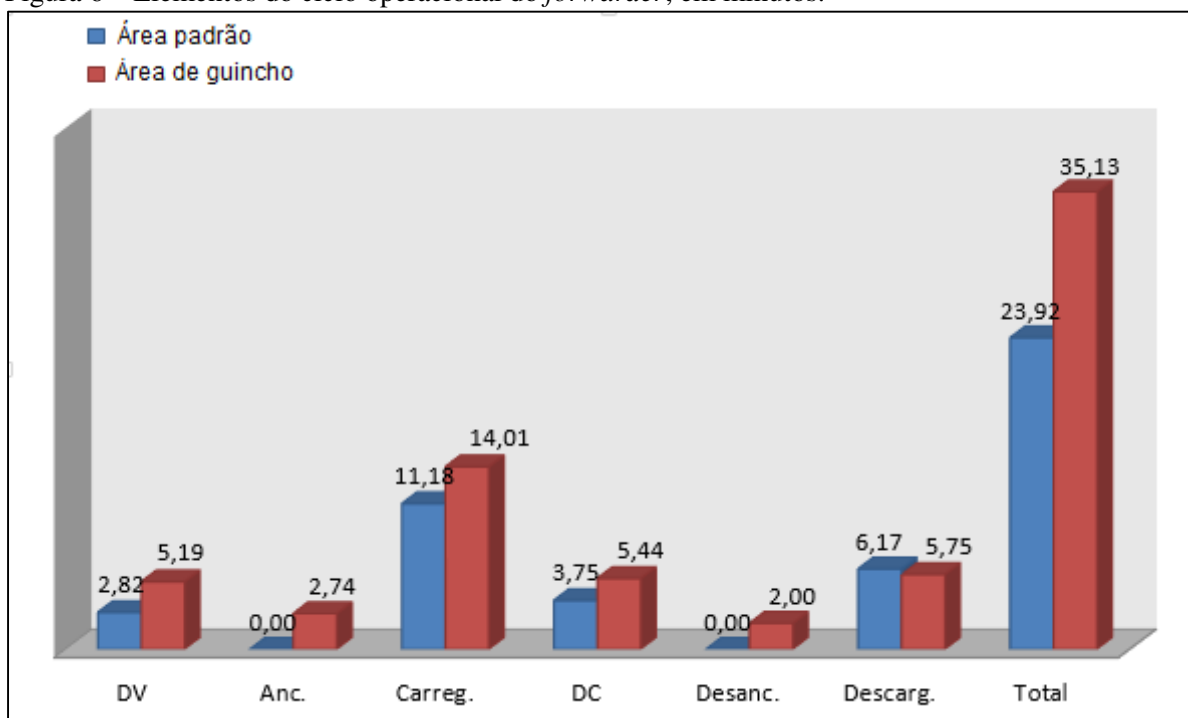
Na inclinação de 27 a 36°, as atividades de ancoragem e desancoragem do guincho de tração auxiliar representaram 7,79 e 5,69% do tempo total do ciclo operacional do *forwarder*, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Robert (2013), em que as atividades de instalação e desinstalação do guincho corresponderam a aproximadamente 10% do tempo total do ciclo operacional de extração com *forwarder*, em inclinações superiores a 25°.

Vale destacar que as atividades de ancoragem e desancoragem do guincho de tração auxiliar não ocorrem em todos os ciclos operacionais de extração do *forwarder* em área de 27° a 36°, pois a máquina pode executar vários ciclos ancorada em um mesmo ponto de fixação.

Ressalta-se ainda que, estas atividades sofrem influência das diversas condições operacionais em que o guincho é utilizado, podendo o mesmo ser instalado tanto no interior do talhão quanto próximo ou acima da estrada. Neste último caso, é necessário acrescentar o tempo de sinalização da estrada, a fim de se evitar o acesso de veículos e pessoas nas proximidades das áreas de trabalho.

A Figura 6 apresenta os tempos efetivos em minutos, das etapas do ciclo operacional da extração florestal com o *forwarder* em ambas as inclinações do terreno, evidenciando-se a influência desta variável.

Figura 6 – Elementos do ciclo operacional do *forwarder*, em minutos.



DV = Deslocamento vazio; Anc. = Ancoragem; Carreg. = Carregamento; DC = Deslocamento carregado; Desanc. = Desancoragem, e; Descarg. = Descarregamento. Fonte: Próprio Autor

O tempo médio efetivo do ciclo operacional do *forwarder* nas duas condições operacionais avaliadas, área sem guincho e com guincho, foi de 00h:23':55'' para uma distância de extração 142,5 metros e de 00h:35':08'' para uma DE de 113,5 metros, respectivamente. Verifica-se que o tempo de execução da atividade de extração com *forwarder* em área de guincho foi de 00h:11':13'' superior ao tempo desta mesma atividade realizada em área sem uso do guincho. Deste valor, 42,28% do tempo (00h:04':44'') é relativo às atividades de ancoragem e desancoragem do guincho de tração auxiliar.

Segundo Coelho (2016), o guincho de tração auxiliar funciona sincronizado com o sistema de transmissão do *forwarder*, sendo assim, a velocidade de deslocamento da máquina deve ser compatível com a saída do cabo de aço do guincho, portanto, é inferior a alcançada em situações sem o uso deste mecanismo. A adaptação de um sistema de guincho com velocidades

similares da máquina tem potencial para aumentar a rendimento do *forwarder* durante o uso deste equipamento.

O tempo de carregamento do *forwarder* em locais com uso do guincho foi 25,31% superior a mesma atividade sem o uso deste equipamento. Um dos fatores que contribui neste percentual é o fato de que os operadores precisam parar a máquina para realizar a ancoragem e desancoragem do GTA. Além disso, essa situação de trabalho requer mais cautela dos operadores na formação da carga, pois os toretes de madeira podem deslizar do compartimento de carga caindo no solo ou, até mesmo, colidir com a cabine da máquina. Ressalta-se ainda que, à medida que a inclinação do terreno aumenta, a pilha de madeira formada pelo *harvester* tende a ficar desorganizada. Desta forma, os operadores de *forwarder* consomem maior tempo para recolher algum torete desalinhado ou desarranjado.

A parcial descarregamento foi praticamente igual em ambas as situações avaliadas. Isto pode ser explicado pelo fato de que este elemento independe da inclinação do terreno ou da distância de extração, variando este tempo de acordo com a habilidade e, ou técnica utilizada pelo operador.

### 5.1.2. Eficiência operacional, disponibilidade mecânica e taxa de utilização

A tabela 3 apresenta os percentuais de Eficiência Operacional, Disponibilidade Mecânica e Taxa de Utilização do *forwarder* nas duas situações avaliadas.

Os elementos operacionais de ancoragem e desancoragem do guincho de tração auxiliar contribuíram para a baixa eficiência em área de colheita com guincho e, consequentemente, menor taxa de utilização. Apesar disso, a eficiência operacional, em ambas as área avaliadas, podem ser consideradas satisfatórias, pois atualmente a maior parte das empresas florestais consideram como limite aceitável para este indicador o valor de 70%.

Tabela 3 – Eficiência operacional, disponibilidade mecânica e taxa de utilização do *forwarder*.

<b>Tipo de colheita</b>	<b>Eficiência Operacional (%)</b>	<b>Disponibilidade Mecânica (%)</b>	<b>Taxa de Utilização (%)</b>
<b>Sem guincho</b>	85,00	79,00	67,15
<b>Com guincho</b>	70,00	78,00	54,60
<b>Média</b>	77,50	78,50	60,87

Os valores de Disponibilidade Mecânica foram semelhantes em ambas as áreas avaliadas com média de 78,5%. Este valor pode ser considerado baixo, quando comparado aos resultados encontrados por Linhares et al. (2012) e Simões e Fenner (2010),

O fato de que neste estudo, as máquinas e equipamentos avaliados estavam com pouco tempo de uso, ou seja, em boas condições operacionais, não contribuiu para o bom desempenho deste indicador. Isto é explicado pelas extremas condições de trabalho em que estes equipamentos são submetidos provocando frequentes paradas para manutenções.

## 5.2. Modelagem da produtividade do *forwarder*

As produtividades de extração de madeira sem casca, em metros cúbicos, por hora efetivamente trabalhada pelo *forwarder* encontram-se divididas em função das duas situações avaliadas, ou seja, área de colheita sem guincho e área de guincho.

O rendimento operacional do *forwarder* na execução da extração florestal foi estimado a partir das variáveis: inclinação do terreno e distância de extração.

As equações de predição dos valores de produtividade do *forwarder* em área sem uso do guincho e área de guincho são apresentadas na Tabela 4, acompanhadas de seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) ajustados.

Tabela 4 – Equações ajustadas para determinação da produtividade do *forwarder*.

Tipo de colheita	Equação	$R^2$
Sem guincho	A) $\text{Prod} = 45,49165 - 0,06828 \cdot \text{INC} - 0,03476 \cdot \text{DE}$	0,80
Com guincho	B) $\text{Prod} = 41,13487 - 0,37200 \cdot \text{INC} - 0,03663 \cdot \text{DE}$	0,76

Prod = produtividade do *forwarder* ( $\text{m}^3/\text{h}$ ); INC = inclinação do terreno (graus), e; DE = distância de extração (m).

Os valores de  $R^2$  mostram que as variáveis independentes explicaram a produtividade do *forwarder* em 80 e 76%, para as áreas com guincho e sem guincho, respectivamente.

As correlações entre a produtividade do *forwarder* na extração florestal mecanizada e, as variáveis que influenciam a atividade “distância de extração” e “inclinação do terreno” são apresentadas na tabela 5, para área de colheita sem guincho e com guincho, respectivamente.

Tabela 5 – Correlação das variáveis influentes na produtividade do *forwarder* na extração florestal em área de colheita sem guincho e com guincho.

Tipo de colheita	Variáveis	INC	DE	PROD
Sem guincho	INC	1.0000000		
	DE	0,3224017	1.0000000	
	PROD	-0,3953386	-0,8902185	1.0000000
Com guincho	INC	1.0000000		
	DE	0,08551511	1.0000000	
	PROD	-0,27533765	-0,85214113	1.0000000

INC = Inclinação do terreno (°); DE = Distância de extração (m), e; PROD = Produtividade do *forwarder* (m³/h).

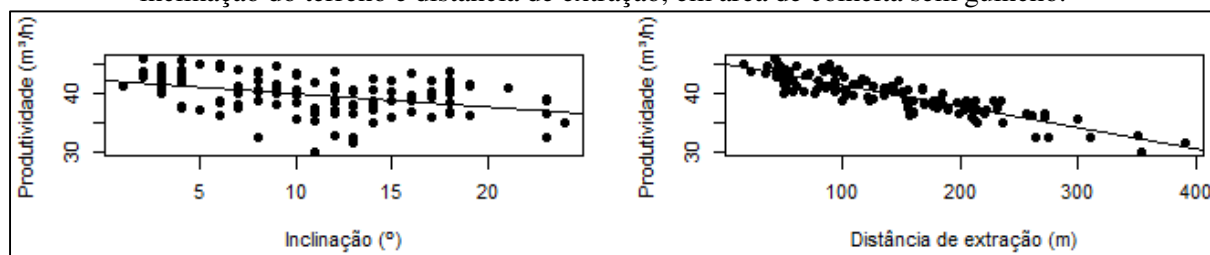
Dentre as variáveis avaliadas no modelo, a que mais explica a produtividade estimada pela regressão linear é a distância de extração. Observa-se que essa variável apresentou correlação significativa e negativa tanto em área sem guincho quanto em área de guincho, mostrando um padrão geral de variação inversa da produtividade do *forwarder* com o DE. Este resultados corroboram com (LEITE et al., 2014; HITTENBECK, 2013; ROBERT, 2013; MOREIRA, 2000) que constataram em seus trabalhos, que a produtividade do *forwarder* decrescia à medida que a inclinação do terreno aumentava.

A associação entre a produtividade e inclinação seguiu mesma tendência da DE, ou seja, a produtividade do *forwarder* variou inversamente ao incremento da inclinação do terreno, em ambas as áreas avaliadas, porém com menor grau de correlação quando comparado à DE.

### 5.2.1. Área de colheita sem guincho

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos na extração de madeira pelo *forwarder* em área de colheita sem guincho, os quais são visualizados juntamente com a análise exploratória. Conforme esperado, a produtividade de extração da madeira pelo *forwarder* estabeleceu uma relação inversamente proporcional a inclinação do terreno e distância de extração.

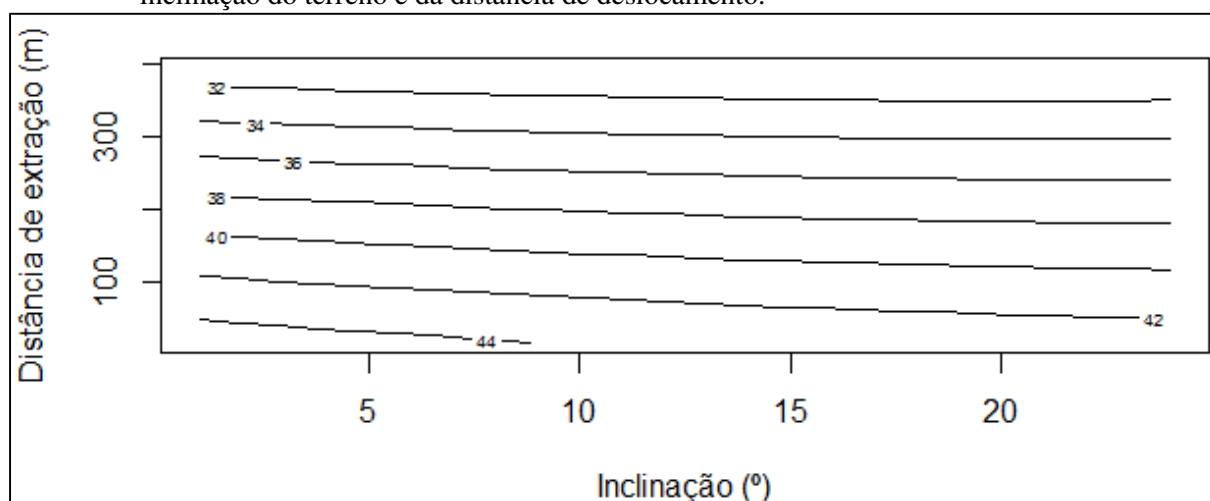
Figura 7 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do *forwarder* em função da inclinação do terreno e distância de extração, em área de colheita sem guincho.



Fonte: Próprio Autor

A produtividade média do *forwarder*, em área de colheita sem guincho, foi de 37,62 m³/h. A Figura 8 apresenta os resultados da modelagem da capacidade de extração de madeira pelo *forwarder* em área sem uso do guincho, em função da inclinação do terreno em graus e, da distância de extração em metros, verificada pela equação A da tabela 6.

Figura 8 – Produtividade do *forwarder* em m³/h, em área de colheita sem guincho, em função da inclinação do terreno e da distância de deslocamento.

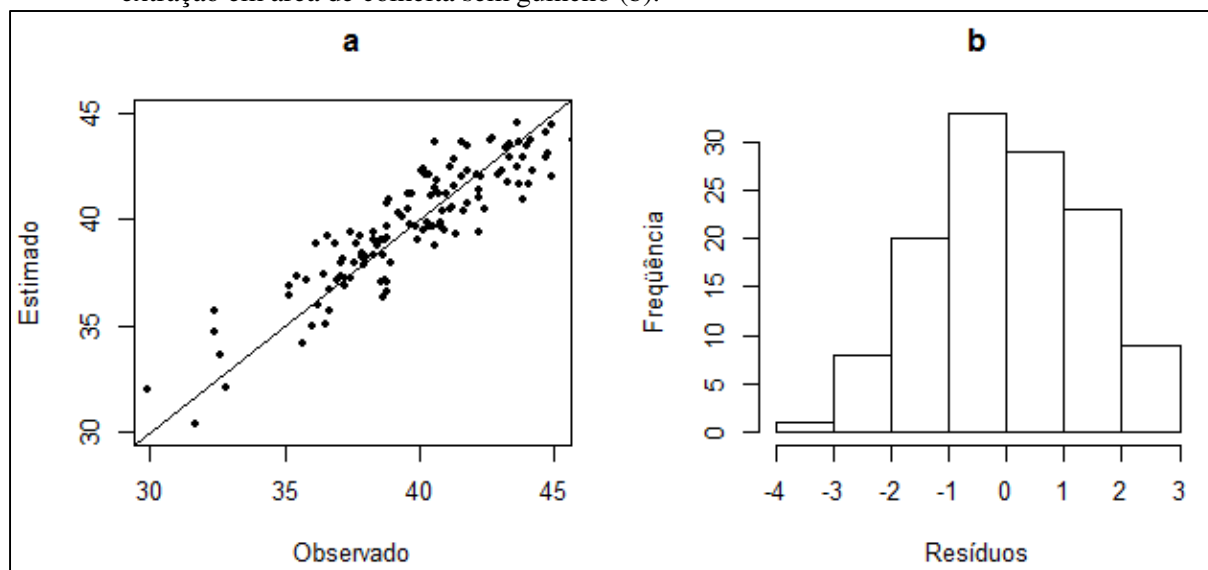


Fonte: Próprio Autor

A Figura 9 apresenta o ajuste do modelo, mostrando o gráfico de dispersão dos dados e de normalidade. E, a tabela 6 mostra significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *forwarder* operando em área de colheita sem guincho.



Figura 9 – Relação entre a produtividade observada do *forwarder* com a produtividade estimada em área de colheita sem guincho (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para a extração em área de colheita sem guincho (b).



Fonte: Próprio Autor

Tabela 6 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *forwarder* operando em área de colheita sem guincho.

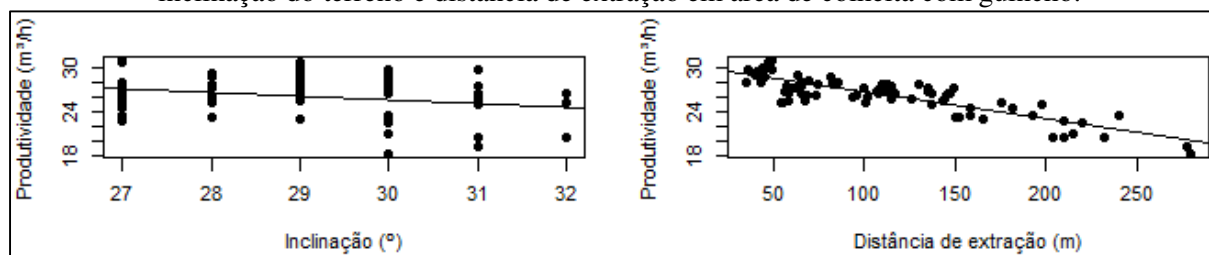
Parâmetros	Estimativa	Erro padrão	t calculado	p-valor
Intercepto	45.491654	0.322521	141.050	$3,404e^{-35**}$
INC	-0.068283	0.024016	-2.843	0,005251**
DE	-0.034758	0.001736	-20.019	$4,671e^{-40**}$

INC = Inclinação; DE = Distância de extração

### 5.2.2. Área de colheita com guincho

Os resultados obtidos na extração de madeira pelo *forwarder* em área de guincho são visualizados juntamente com a análise exploratória na Figura 10. Observa-se que a produtividade estabeleceu uma relação inversa com a inclinação e distância de extração.

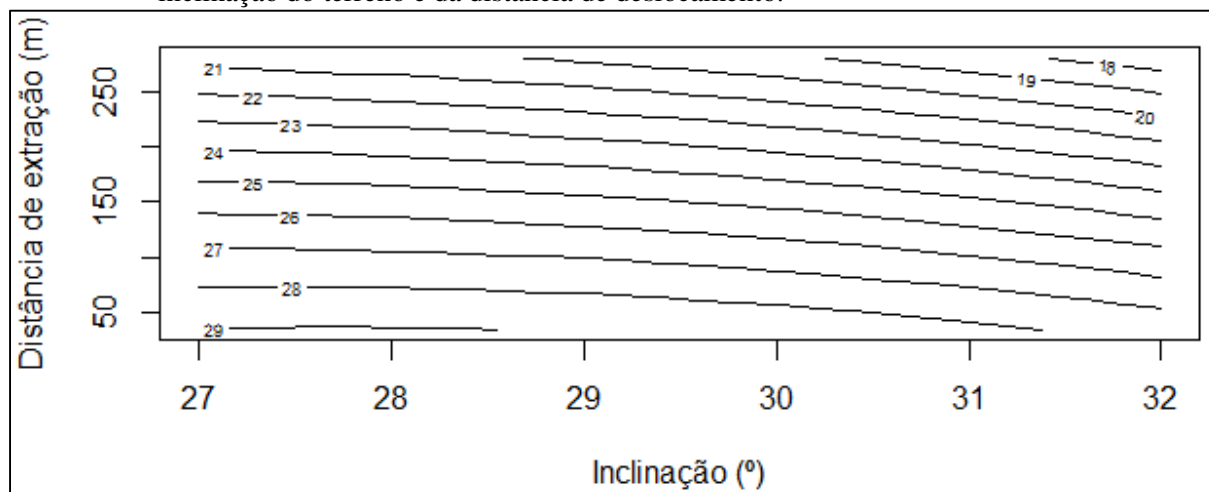
Figura 10 – Tendência de comportamento dos valores da produtividade do *forwarder* em função da inclinação do terreno e distância de extração em área de colheita com guincho.



Fonte: Próprio Autor

A produtividade média do *forwarder*, em área com guincho, foi de 25,62 m³/h. A Figura 11 mostra os resultados da modelagem da produtividade de extração de madeira em m³/h do *forwarder* em área de guincho, em função da inclinação do terreno, em graus e, da distância de extração, em metros, comprovado pela equação B da tabela 5.

Figura 11 – Produtividade do *forwarder*, em (m³/h), em área de colheita com guincho, em função da inclinação do terreno e da distância de deslocamento.



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 7 apresenta a significância dos parâmetros da modelagem da produtividade de extração de madeira em área de guincho.

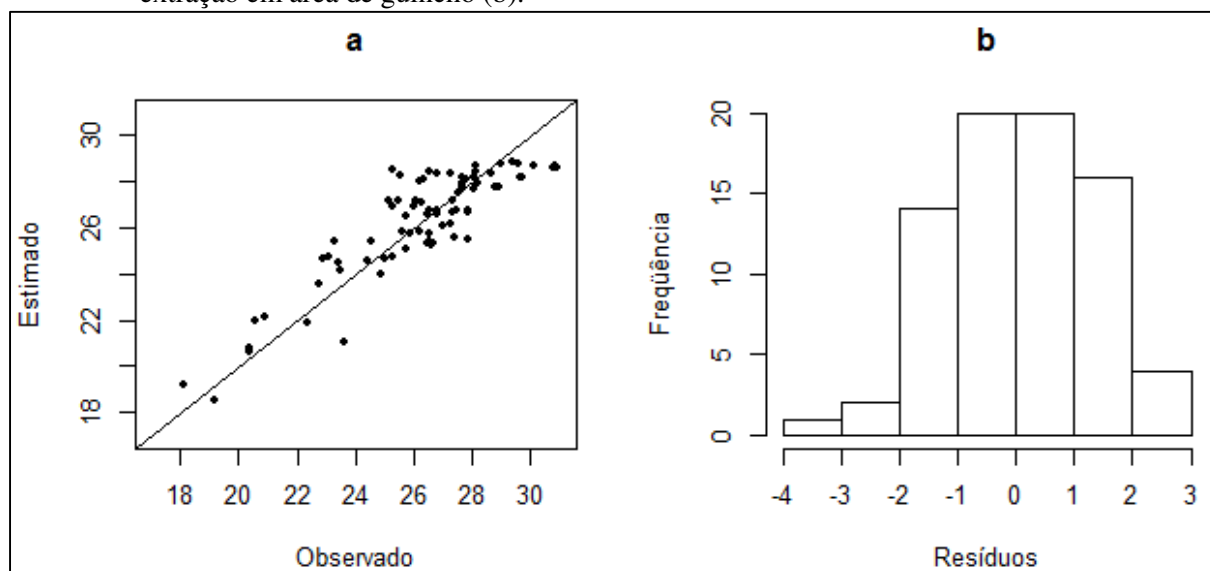
Tabela 7 – Significância dos parâmetros da modelagem da produtividade do *forwarder* operando em área de colheita com guincho.

Parâmetros	Estimativa	Erro padrão	t calculado	p-valor
Intercepto	41.134979	2.959774	13.898	$2,543e^{-22**}$
INC	-0.372004	0.102625	-3.625	0,00052**
DE	-0.036635	0.002469	-14.835	$7,171e^{-24**}$

INC = Inclinação; DE = Distância de extração

A Figura 12 apresenta o ajuste do modelo, mostrando o gráfico de dispersão dos dados e de normalidade.

Figura 12 – Relação entre produtividade observada do *forwarder* com a produtividade estimada em área de colheita com guincho (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado para a extração em área de guincho (b).



Fonte: Próprio Autor

### 5.2.3. Influência das variáveis na produtividade

Os resultados obtidos mostraram conformidade com Cavalli et al. (2009), que concluíram que longas distâncias de deslocamento durante a extração, associados a um declive aumentado no terreno são variáveis que, contribuem para a diminuição da produtividade do *forwarder*.

A produtividade média durante o estudo na condição de inclinação de 0 a 27° foi de 37,62 m<sup>3</sup>/h, enquanto na condição de maior inclinação (27 a 36°) foi de 25,62 m<sup>3</sup>/h, considerando um turno de trabalho de 8 horas e eficiência operacional média de 78,6% em

ambas áreas avaliadas. A maior produtividade em área de colheita sem guincho é justificada pelo fato desta condição de terreno favorecer a execução da atividade, sendo um fator determinante na variação deste indicador.

Minette et al. (2004), avaliando o *forwarder* da marca Timberjack, modelo 1210B na extração de madeira de eucalipto encontraram as produtividades de 35,47 e 40,15 m<sup>3</sup>/h.

O efeito da distância de extração foi mais expressivo sobre a produtividade do *forwarder* operando com guincho de tração auxiliar. Portanto, esta variável é decisiva na determinação da produtividade do *forwarder* com GTA. Desta forma, objetivando diminuir distância de extração, torna-se essencial a otimização da densidade de estradas, bem como alocação adequada das mesmas.

A redução da distância de extração resulta em menor frequência de passadas do *forwarder* em uma faixa / eito de extração. De acordo com Lopes (2015), inúmeras passadas do *forwarder* nas trilhas de extração contribuem para a compactação do solo. Silva et al. (2007), afirmam que a passagem da máquina várias vezes em um mesmo local pode facilitar processos erosivos e dificultar o crescimento de raízes. Segundo estes autores, o efeito do atrito dos pneus sobre a serrapilheira reduz a infiltração da água no solo, resultando no aumento do escoamento superficial e erosão hídrica. Este processo é favorecido em locais com inclinações acentuadas.

As Tabelas 8 e 9 apresentam as produtividades estimadas para o *forwarder* em função da inclinação e distância de extração para operação em área de colheita sem guincho e de guincho, respectivamente.

Tabela 8 – Produtividade estimada, em m<sup>3</sup>/h, para o *forwarder* em função da inclinação do terreno e distância de extração em área de colheita sem guincho.

	Distância de extração (m)									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
<b>3</b>	43,55	41,81	40,07	38,34	36,60	34,86	33,12	31,38	29,65	27,91
<b>6</b>	43,34	41,61	39,87	38,13	36,39	34,65	32,92	31,18	29,44	27,70
<b>9</b>	43,14	41,40	39,66	37,93	36,19	34,45	32,71	30,97	29,24	27,50
<b>12</b>	42,93	41,20	39,46	37,72	35,98	34,24	32,51	30,77	29,03	27,29
<b>15</b>	42,73	40,99	39,25	37,52	35,78	34,04	32,30	30,56	28,83	27,09
<b>18</b>	42,52	40,79	39,05	37,31	35,57	33,84	32,10	30,36	28,62	26,88
<b>21</b>	42,32	40,58	38,84	37,11	35,37	33,63	31,89	30,15	28,42	26,68
<b>24</b>	42,11	40,38	38,64	36,90	35,16	33,43	31,69	29,95	28,21	26,47
<b>27</b>	41,91	40,17	38,43	36,70	34,96	33,22	31,48	29,74	28,01	26,27

Tabela 9 – Produtividade estimada, em m<sup>3</sup>/h, para o *forwarder* em função da inclinação do terreno e distância de extração em área de colheita com guincho.

Distância de extração em área de cobertura com gumeiro:											
Inclinação(°)	Distância de extração (m)										
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
	28	28,89	27,06	25,22	23,39	21,56	19,73	17,90	16,06	14,23	12,40
	30	28,14	26,31	24,48	22,65	20,82	18,98	17,15	15,32	13,49	11,66
	32	27,40	25,57	23,74	21,90	20,07	18,24	16,41	14,58	12,75	10,91
	34	26,66	24,82	22,99	21,16	19,33	17,50	15,66	13,83	12,00	10,17
	36	25,91	24,08	22,25	20,42	18,58	16,75	14,92	13,09	11,26	9,43

A produtividade do *forwarder* em operação com guincho foi inferior a operação sem o uso deste equipamento. A redução da velocidade de deslocamento da máquina, maiores inclinações do terreno e irregularidades do micro relevo são os principais fatores causadores deste decréscimo.

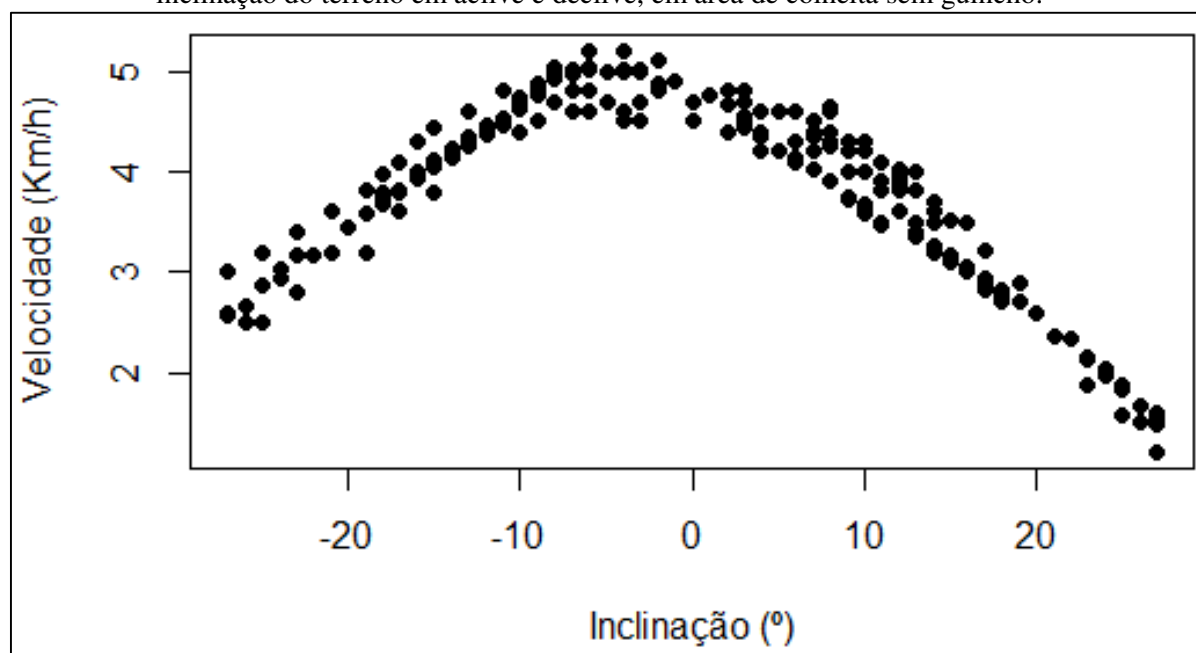
O uso do guincho de tração auxiliar minimiza os efeitos da inclinação do terreno sobre a produtividade. Porém, a capacidade de reboque do guincho faz com que a velocidade de deslocamento da máquina permaneça constante, indiferente da inclinação avaliada.

### 5.3. Velocidade de deslocamento do *forwarder*

O modelo ajustado foi um polinomial de segundo grau, tendo este sido escolhido devido à característica da curva de tendência observada na análise exploratória dos dados.

A Figura 13 apresenta as velocidades atingidas pelo *forwarder* na extração de madeira em função da inclinação do terreno, em área de colheita sem guincho. Observa-se que a velocidade de deslocamento da máquina diminui com o aumento da inclinação do terreno, seja em aclave ou declive, sendo esta redução mais acentuada no sentido do aclave.

Figura 13 – Tendência de comportamento da velocidade do *forwarder*, em Km/h, em função da inclinação do terreno em aclave e declive, em área de colheita sem guincho.



Fonte: Próprio Autor

Conforme esta Figura, para terrenos planos, a velocidade de deslocamento do *forwarder* é de aproximadamente 4,75 km/h. A velocidade máxima é atingida em percursos com declive entre -3 e -8°, ficando praticamente constante neste intervalo. A velocidade mínima é atingida em aclave de aproximadamente 27°.

A Tabela 10 apresenta a equação de predição dos valores de velocidade do *forwarder* em área de colheita sem guincho, com seu respectivo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ajustado.

Tabela 10 – Equação de velocidade do *forwarder* ajustada.

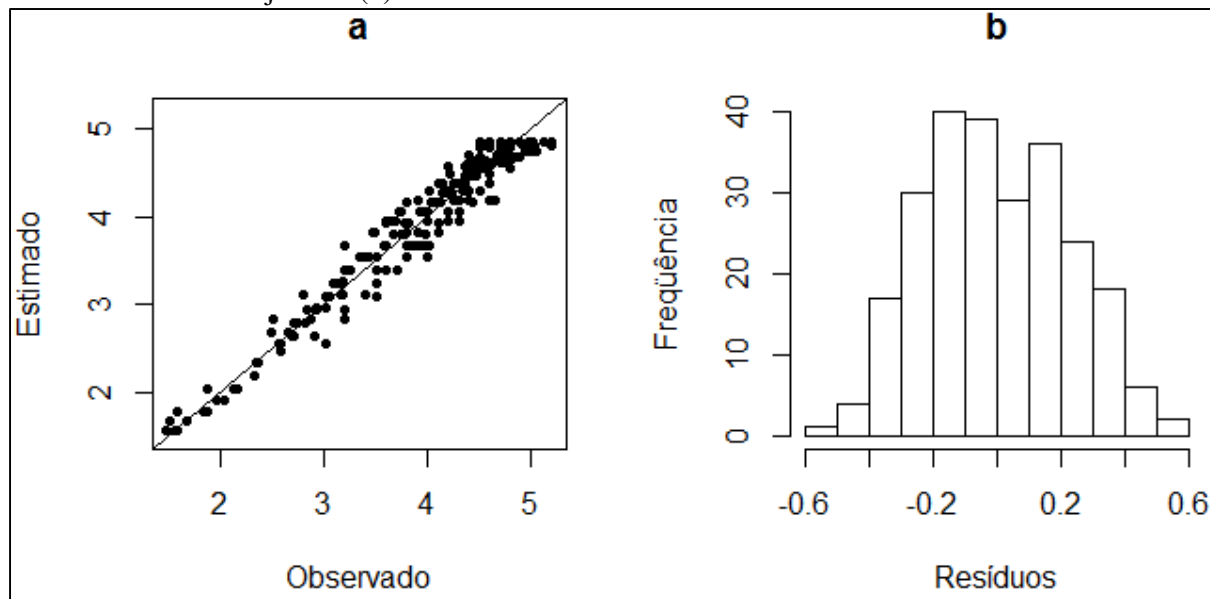
Tipo de colheita	Equação	$R^2$
Sem guincho	$VEL = 4,605225 - 0,003850 \cdot INC^2 - 0,029958 \cdot INC$	0,93

VEL = velocidade do *forwarder* (Km/h); INC = inclinação do terreno (graus)

A velocidade do *forwarder* foi explicada pelas variáveis independentes em 93%, em área sem guincho.

A Figura 14 apresenta a qualidade de ajuste do modelo.

Figura 14 – Relação da velocidade observada do *forwarder* com a velocidade estimada pelo modelo operando em área de colheita sem guincho (a). Histograma dos resíduos referentes ao modelo ajustado (b).



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 11 apresenta a significância dos parâmetros da modelagem da velocidade de deslocamento do *forwarder* na extração de madeira.

Tabela 11 – Significância dos parâmetros da modelagem da velocidade do *forwarder* operando em área de colheita sem uso de guincho.

Parâmetros	Estimativa	Erro padrão	t calculado	p-valor
Intercepto	4.605225	$2.18e^{-02}$	211.06	$3,818^{-28**}$
INC <sup>2</sup>	-0.003850	$7.754e^{-05}$	-49.66	$3,757^{-13**}$
INC	-0.029958	$1.055e^{-03}$	-28.39	$4,115^{-74**}$

INC = Inclinação (°)

Em área de colheita sem guincho, a velocidade média do *forwarder* durante a coleta de dados em campo foi de 3,82 km/h.

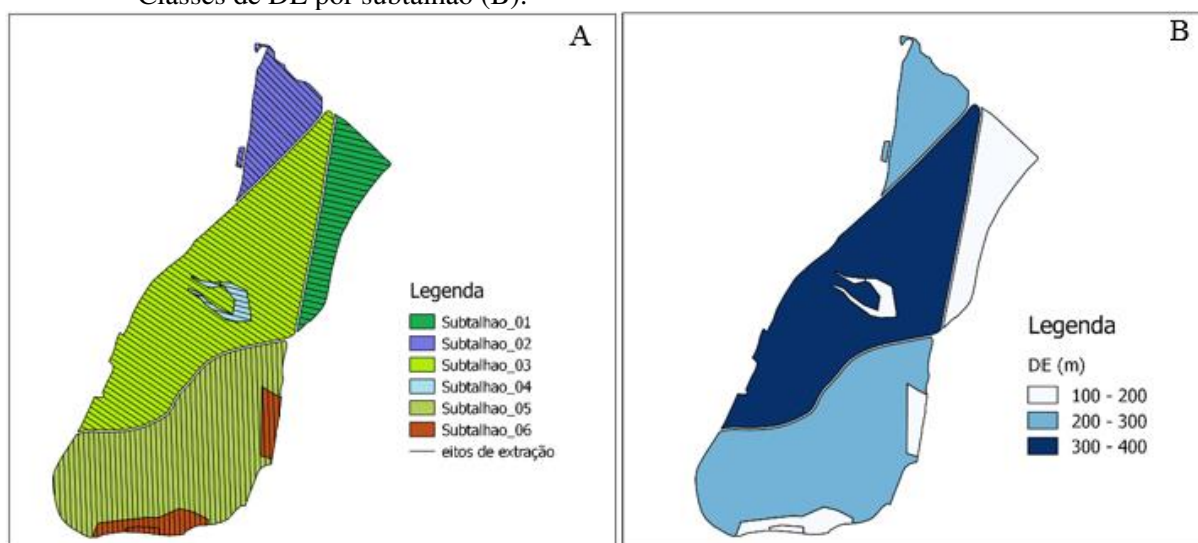
Em área de colheita com guincho, não foi possível ajustar uma equação de velocidade de deslocamento do *forwarder*, pois a mesma se mantém praticamente constante ao longo do eito de extração. Pois, nesta situação a velocidade do *forwarder* é controlada pelo mecanismo de liberação e tracionamento do guincho de tração auxiliar. O valor máximo de velocidade medido em área de guincho foi de 1,47 km/h e mínimo de 1,12 km/h, sendo a média de 1,30 km/h.

## 5.4. Mapa de produtividade do *forwarder*

### 5.4.1. Distância de extração

A figura 15-A apresenta o mapa de eitos de extração do talhão selecionado. Percebe-se que, conforme mapa de microplanejamento da empresa, para cada subtalhão tem-se uma direção de saída da madeira. O número e comprimento dos eitos de extração são diferentes para cada subtalhão, uma vez que possuem tamanhos e formatos distintos. A figura 15-B apresenta a classificação dos subtalhões em classes com amplitude de 100 metros. Verifica-se que os subtalhões 1, 4 e 6 possuem DE de 100 a 200 metros. Os subtalhões 2 e 5 foram classificados com DE variando entre 200 e 300 metros. Por sua vez, o subtalhão 3 apresentou DE entre 300 e 400 metros.

Figura 15 – Mapa de eitos de extração do talhão selecionado com seus respectivos subtalhões (A), e; Classes de DE por subtalhão (B).



DE = Distância de extração (m). Fonte: Próprio Autor

A tabela 12 apresenta os resultados de distância de extração calculada para o talhão selecionado que apresentou um total de 219 eitos de extração. A distância de extração, obtida via ArcGIS foi de 112,79 metros, com valor máximo de 345,53 metros e, mínimo de 8,68 metros. Optou-se por excluir os eitos de extração menores do que 5 metros, pelo fato de ser uma distância muito pequena para realizar deslocamentos e manobras com a máquina.



Tabela 12 – Valores de distância de extração obtidos para o talhão selecionado.

	Sub 01	Sub 02	Sub 03	Sub 04	Sub 05	Sub 06	Talhão
<b>Nº de eitos</b>	35	26	78	7	47	26	<b>219</b>
<b>Menor</b>	16,88	8,68	20,42	39,06	33,90	19,41	<b>8,68</b>
<b>Maior</b>	161,66	228,96	345,53	113,44	227,69	187,88	<b>345,53</b>
<b>Média</b>	81,26	122,02	197,31	77,22	140,88	58,08	<b>112,79</b>

Sub = Subtalhão.

A distância de extração é um dos fatores que influenciam a eficiência das operações florestais. Aspectos econômicos, ambientais e sociais da extração de madeira dependem da distância de extração. Distâncias de extração mais longas geralmente levam a redução de produtividade, custo mais elevado, maior consumo de energia e maior tensão nos operadores da máquina, por exemplo, exposição a vibrações (ROTTENSTEINER, 2014). Desta forma, estes resultados podem ser de grande ajuda prática no planejamento da extração florestal e, conseqüentemente, na redução de custos do sistema de colheita de toras curtas.

De acordo com Sokolović e Bajrić (2013) a construção de novas estradas florestais a fim de aumentar a acessibilidade da floresta pode ser economicamente justificada se a distância de extração for reduzida.

#### 5.4.2. Inclinação

Durante a avaliação dos dados coletados a campo para a análise operacional foi observado que, os valores de inclinação medidos pelo clinômetro embarcado nas máquinas, forneceram informações que são importantes para a colheita florestal em terrenos declivosos. Pois, uma informação precisa e em tempo real sobre a variação de inclinação no talhão auxilia a tomada de decisão do operador quanto ao uso do guincho de tração auxiliar.

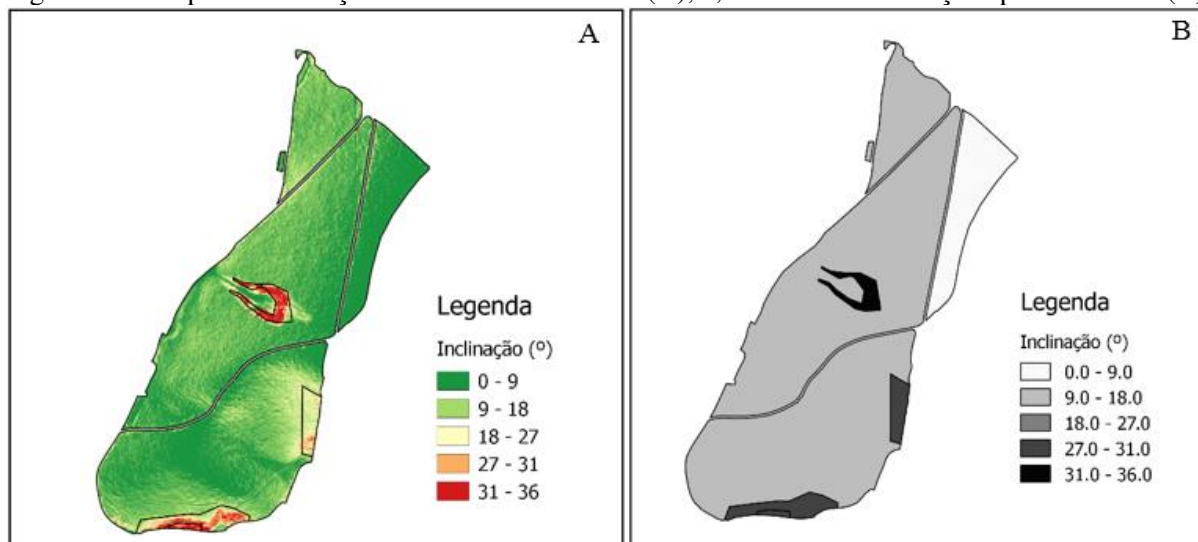
Em primeira análise foi observado que tanto os dados obtidos diretamente do computador de bordo das máquinas, quanto os dados gerados a partir do sensor *LiDAR* mostraram que a variação de inclinação medida durante a coleta de dados é muito semelhante com o que está presente fisicamente na área.

Para efeito de correlações com produtividade é muito importante que seja confiável a informação da variação de inclinação do terreno, pois um incremento nesta variável reduz o rendimento operacional do *forwarder*.

A partir da nuvem de pontos LiDAR foram elaborados mapas de inclinação de cada talhão/subtalhão em que houve extração florestal. Em alguns talhões a variação da inclinação englobou tanto a área sem guincho como área de guincho, resultando em grande variação do rendimento operacional do *forwarder*.

A figura 16-A mostra o mapa de inclinação do talhão selecionado gerado a partir dos dados *LiDAR*. A figura 16-B classifica os subtalhões em classes fixas de inclinação. Desta forma, o talhão 1 que possui menor inclinação, aparece na classe de 0 a 9°. Já os subtalhões 2, 3 e 5 pertencem a uma mesma classe de inclinação, que varia de 9 a 18°. Os demais subtalhões foram classificados em área de guincho, sendo que, o subtalhão 6 pertence à classe de 27 a 31° e, o subtalhão 4 está inserido na classe de 31 a 36° de inclinação.

Figura 16 – Mapa de inclinação do talhão selecionado (A), e; Classes de inclinações por subtalhão (B).



Fonte: Próprio Autor

A partir da análise dessa figura percebe-se que dois subtalhões (4 e 6) estão em área de colheita com guincho (27 a 36°) e, os demais em área de colheita sem guincho (0 a 27°). Esta informação é importante para elaboração de mapas de microplanejamento da extração em uma empresa florestal. A tabela 13 apresenta os resultados de inclinação calculada para o talhão selecionado.

Tabela 13 – Valores de inclinação obtidos para o talhão selecionado.

	Sub 01	Sub 02	Sub 03	Sub 04	Sub 05	Sub 06	Talhão
<b>Nº cel.</b>	45415	42687	214838	7254	178946	19917	<b>509057</b>
<b>Menor</b>	0,01	0,34	0,11	2,12	0,07	0,25	<b>0,01</b>
<b>Maior</b>	44,10	50,13	49,41	49,50	39,11	46,55	<b>50,13</b>
<b>Média</b>	7,97	15,34	13,32	32,51	13,10	28,44	<b>18,45</b>

Sub = Subtalhão; Nº cel. = número de células analisadas pelo *software* na respectiva camada raster.

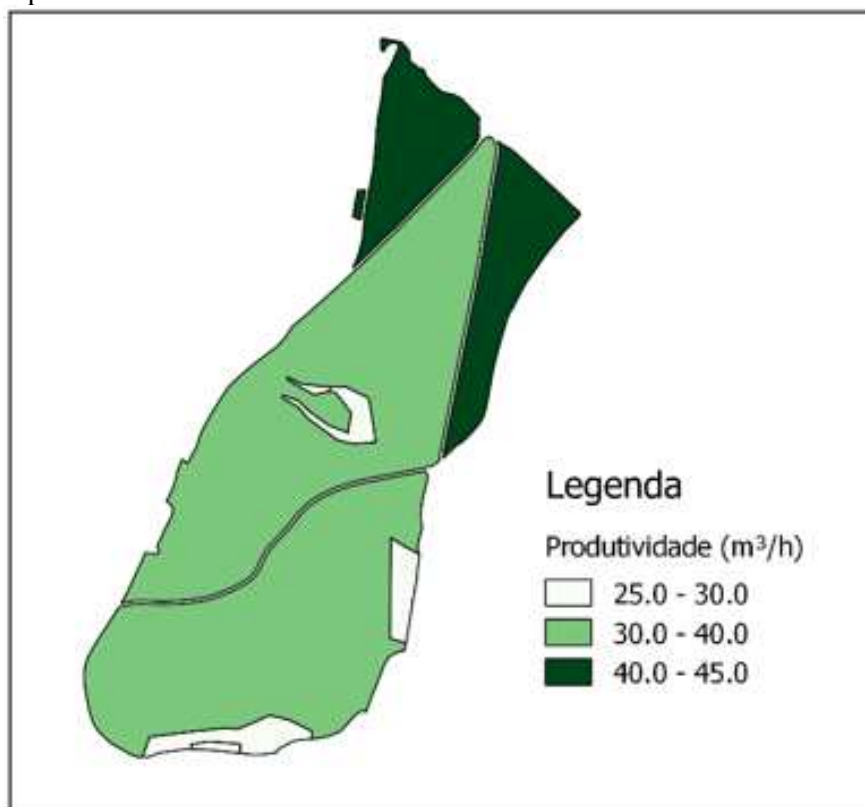
O *software* SIG analisou 509057 células na camada *raster* do talhão selecionado. A inclinação média obtida foi de 18,45°, com valor máximo de 50,13° e, mínimo de 0,01°. Ressalta-se que estas informações são oriundas de uma análise geral do talhão selecionado, sendo necessário estratificar o talhão em área de colheita sem guincho e de guincho para melhorar a estimativa dos dados. Desta forma tem-se uma inclinação média de 12,43° para área de colheita sem guincho e 30,48° para área de guincho.

Destaca-se ainda que, os valores de inclinação acima de 36° calculados pelo *software* GIS não interferem no resultado final, pois os mesmos são oriundos de um número muito pequeno de células analisadas pelo programa.

#### 5.4.3. Mapa de produtividade por talhão/subtalhão

Na figura 17 é representado o mapa de classes de produtividade em nível de subtalhão, em metros cúbicos por hora efetivamente trabalhada do *forwarder*, na extração de madeira do talhão selecionado.

Figura 17. Mapa de produtividade do talhão selecionado.



Fonte: Próprio Autor

De acordo com essa figura, nos subtalhões 1 e 2 a extração florestal com o *forwarder* tende a alcançar maior rendimento operacional. Tal resultado pode ser explicado pelo fato destes subtalhões apresentarem inclinações baixas e DE medianas. Nos subtalhões 3 e 4, o rendimento tende a ficar entre 30 e 40 m³/h, pois apesar de possuir os maiores valores de DE, estes apresentam inclinação moderada que favorece o deslocamento da máquina. Por fim, nos subtalhões 5 e 6 a tendência é uma redução significativa do rendimento da extração com o *forwarder*, pelo fato destes subtalhões estarem localizados em área muito declivosa (acima de 27°), exigindo o uso do GTA.

A tabela 14 apresenta os valores finais de Inclinação, DE e produtividade obtidos pelo *software* SIG para o talhão selecionado, em nível de subtalhão.

Tabela 14 – Valores de Inclinação, DE e Produtividade obtidos para o talhão selecionado.

Subtalhão	Inclinação (°)	DE (m)	Prod. (m³/hora)
1	7,97	162,52	42,12
2	15,34	244,03	40,20
3	13,32	394,62	37,72
4	32,51	154,44	26,21
5	13,10	281,76	39,70
6	27,44	116,15	28,80
<b>Média</b>	<b>19,32</b>	<b>214,35</b>	<b>35,01</b>

DE = Distancia de extração; Prod. = Produtividade média do *forwarder*.

De acordo com essa tabela verifica-se que a inclinação média do talhão foi de 19,32°, a distância de extração obtida foi de 214,35 metros e, a produtividade média de 35,01 m³/h. Vale ressaltar que estes dados são relativos ao tempo efetivamente trabalhado, sendo necessário levar em consideração a eficiência operacional (EOp) da máquina em cada situação de trabalho específica. No caso deste trabalho a EOp média foi de 77,5%, para ambas as área avaliadas.

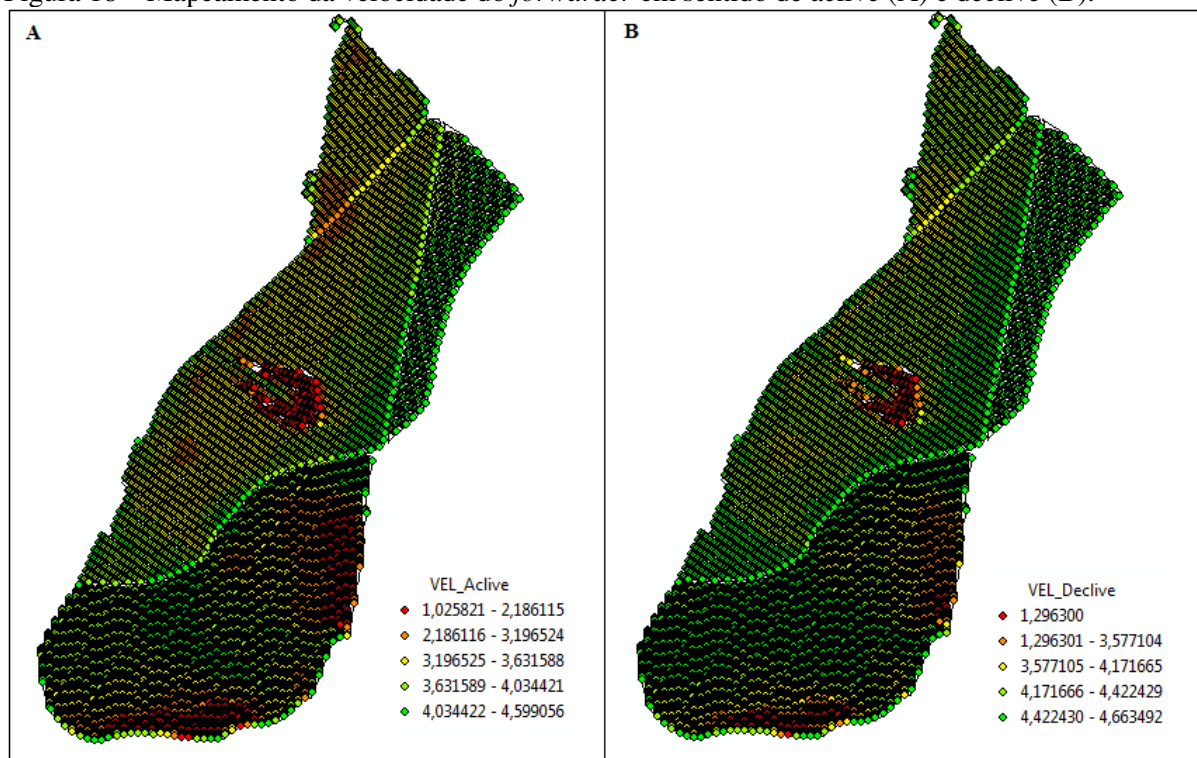
Para obter o mapeamento da produtividade dos demais talhões e projetos da empresa, basta replicar a metodologia descrita neste estudo.

A empresa florestal utilizando das informações de produtividade do *forwarder* pode determinar os custos dessa máquina para cada talhão, dando maior apoio no processo de planejamento da colheita florestal. E, de acordo com Bertin (2010) conhecer a produtividade das máquinas sob diferentes condições de operação vem a ser uma importante ferramenta de trabalho na indicação e direcionamento das máquinas necessárias para a atividade de mecanização.

### 5.5. Implementação da velocidade de deslocamento do *forwarder* em ambiente SIG

A figura 18 apresenta o mapa de velocidade atingida pelo *forwarder* durante a extração de madeira, em aclave (A) e em declive (B).

Figura 18 – Mapeamento da velocidade do *forwarder* em sentido de aclave (A) e declive (B).



Fonte: Próprio Autor

Percebe-se em áreas com relevo mais íngremes, proporcionalmente um menor valor de velocidade atingido pelo *forwarder*. Em declives a máquina possui potencial de desenvolver maiores velocidades. Observou-se ainda que valores de inclinação do terreno próximos de  $27^\circ$  no sentido de aclave tendem a provocar uma drástica redução de velocidade da máquina, podendo esta ser inferior à velocidade alcançada em área de guincho. Isso ocorre porque nesta condição, o operador reduz substancialmente a velocidade de trabalho devido ao risco de acidentes e maiores índice de patinação da máquina.

É possível ainda, calcular o tempo gasto pelo *forwarder* no deslocamento no eito de extração, dividindo a distância de extração percorrida, pela velocidade média atingida no respectivo eito de extração.

Em virtude das características extremas de inclinação das áreas da empresa e por questões de segurança, a velocidade máxima atingida pelo *forwarder* foi de aproximadamente 6 km/h mesmo a máquina avaliada tendo potencial de atingir velocidades acima de 20 km/h, conforme dados do fabricante. Por isso, a amplitude de velocidade máxima e mínima atingida pela máquina no eito de extração foi pequena.

## 6. CONCLUSÕES

A produtividade média do *forwarder* foi de 37,62 m<sup>3</sup>/h, em área de colheita sem guincho, enquanto que em área de colheita com guincho foi de 25,62 m<sup>3</sup>/h.

A modelagem permitiu inferir que a cada 3° de aumento na inclinação do terreno tem-se uma redução de 0,20 m<sup>3</sup>/h no produtividade do *forwarder* em área de colheita sem guincho, e decréscimo de 1,12 m<sup>3</sup>/h em área de guincho.

Relacionado a distância de extração, o incremento de 50 metros nesta variável provoca um decréscimo de 1,74 m<sup>3</sup>/h no rendimento operacional do *forwarder* em área de colheita sem guincho, enquanto que em área com guincho essa redução chega ao valor de 1,83 m<sup>3</sup>/h.

As atividades de carregamento e descarregamento consumiram maior percentual de tempo do ciclo operacional do *forwarder*, representando juntas em média, 72,54 e 56,24%, do tempo total efetivamente trabalhado, para área de colheita sem guincho e com guincho, respectivamente

A velocidade de deslocamento do *forwarder*, em área de colheita sem guincho, diminuiu com o aumento do aclive e declive, sendo esta redução de aproximadamente 0,65 km/h até 9°, de 1,28 km/h até 18° e de 1,90 km/h até 27°.

Em área de colheita sem guincho, a velocidade média atingida pelo *forwarder* foi de 3,82 km/h, porém em área de guincho, a mesma foi de 1,30 km/h.

Os resultados do processamento de geoinformações demonstra o grande potencial da técnica para prever a produtividade do *forwarder* e, apoio no processo de planejamento da colheita florestal.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAY, A. E.; ERDA, O.; SESSIONS, J. Determining productivity of mechanized harvesting machines. **Journal of Applied Sciences**, v. 4, n.1, p. 100-105, 2004.

ANDRADE, S. C. **Avaliação técnica, social, econômica e ambiental de dois subsistemas de colheita florestal no litoral norte da Bahia**. 1998. 125p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

BARNES, R.M. **Estudos de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho**. 6.ed. São Paulo: Edgard Blucher. 635p. 1977.

BARNES, R. M. **Motion and time study: design and measurement of work**. 6.ed. New York: John Wiley e Sons. 799 p. 1986.

BERTIN, V. A. S. **Análise de dois modais de sistemas de colheita mecanizados de eucalipto em 1ª rotação**. 2010. 74f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista, Botucatu–SP, 2010.

BIRRO, M. H. B.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; MINETTI, L. J. Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “track-skidder” em região montanhosa. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.5, p.525-532, 2002.

BRAMUCCI, M. **Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de “harvesters” na colheita de madeira**. 2001. 50f. Dissertação (Mestrado em Recursos florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2001.

BROWN, R. O. **Comparação de modais de trabalho na extração de madeira com conjunto trator agrícola guincho em uma região**. 2018. 90f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e utilização de produtos florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

CARMO, F. C. A.; FIEDLER, N. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Otimização do uso do trator florestal *forwarder* em função da produtividade, custos e capacidade de carga. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.3, p.561-566, 2015.

CASTILHO, A. S.; FERNANDES, D. J. F.; AMARAL, E. J.; BORGES, S. M. Colheita de madeira em áreas com relevo acidentado utilizando equipamentos de alta performance. In:



SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 17., Campinas. **Anais...** Campinas. 374 p. 2014.

CAVALLI, R.; GRIGOLATO, S.; BERGOMI L. Z. Esbosco in ambiente montano com Cable-Forwarder. **Attidel Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura**. Taormina (ME). Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 1476-1481. 16-19 outubro, 2009.

COELHO, R. M. **Modelagem da extração de madeira com o forwarder utilizando o guincho de tração auxiliar**. 2016. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2016.

CONEGLIAN, A.; BATISTA, W. R.; HOKAMA, L. F.; SANTIAGO, F. L. S.; FENNER, P. T. Avaliação do rendimento e do custo operacional do *forwarder* na colheita de eucalipto em primeiro e segundo corte. **R. C. E. E. F.**, Garça, v.15, n.1, p.13-24, 2010.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. New York: McGraw Hill, 2000.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS® Desktop**: release 10.5. Programa para computador. Redlands, CA, 2016.

FENNER, P.T. Avaliação operacional da garra florestal no carregamento de toras curtas de eucalipto. **Revista Florestal Latinoamericana**, 2009.

FERREIRA, L. S. **Estudo de tempos e movimentos na operação de adubação de plantio na empresa Eucatex S.A., Botucatu, São Paulo**. 2011. 28 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

FIGUEIREDO, R. M. C. N. **Áreas de influência de espaços verdes urbanos de proximidade: uma abordagem exploratória na freguesia de arroios**. Dissertação (Mestrado em Urbanismo e Ordenamento de Território). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.

FONTES, J. M. **Desenvolvimento de um sistema informatizado para planejamento e controle de manutenção em máquinas florestais: SIPLAM**. Viçosa, MG: UFV, 1996. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

FREITAS, D. A. F. **Qualidade do solo em sistemas de manejo em latossolos sob cerrado**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, MG, 104p., 2010.

FREITAS, L. C.; MACHADO, C.C.; SANT'ANNA, G. L.; SOUSA, H. T. Ferramentas computacionais no planejamento da colheita florestal. **Revista da Madeira**, nº 92, out., 2005.

GONÇALVES, S. B. **Modelagem matemática da produtividade do corte florestal mecanizado**. 2017. 62f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, 2017.

GUNN, E. A. Some aspects of hierarchical production planning in forest management In: SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSES IN FOREST RESOURCES, 1991, Charleston, South Carolina. **Proceedings...** Asheville, NC:USDA, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. p. 54 - 62. 1991.

HITTENBECK, J. Estimation of trafficable grades from traction performance of a *forwarder*. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v.34, n.1, p.71-81, 2013.

HOFFMANN, R. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. 4. Ed. São Paulo: Hucitec, 2016.

JIROUŠEK, R.; KLVAĚ, R.; SKOUPÝ, A. Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. **Journal of Forest Science**, v.53, n.10, p.476-482, 2007.

LACERDA, L. C.; FIEDLER, N. C.; CHICHORRO, J. F.; CARMO, F. C. A.; MENDONÇA, A. R. Análise operacional da extração florestal mecanizada em módulos próprios e terceirizados. **Nativa**, Sinop, v. 03, n. 03, p. 205-209, jul./set. 2015.

LEITE, A. M. P.; LIMA, J. S. S. **Mecanização**. In: Colheita Florestal. Viçosa, MG: Editora UFV. 600 p. 2002.

LEITE, E. D. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem técnica e de custos do *harvester* no corte de madeira de eucalipto no sistema de toras curtas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 41, n. 98, p. 205-215, 2013.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; LEITE, H. G.; GUEDES, I. L. Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo *forwarder*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.5, p.879-887, 2014.

LEITE, E. D. S. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas**. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

LIMA, J. S. S.; LEITE, A. M. P. **Mecanização**. In: MACHADO, C. C. (Org.). *Colheita florestal*. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. p.43-65. 2008.

LINHARES, M.; JÚNIOR, C. R. S.; CAMPOS, F.; YAMAJI, F. M. Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e *forwarder* na colheita florestal. **Revista da Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 212-219, 2012.

LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., RHIND, D. W. **Geographic information systems and science**. 2nd ed. Chichester: John Wiley& Sons, 2005.

LOPES, E. S.; MISSEL, J. W. P.; DIAS, A. N.; FIEDLER, N. S. Avaliação técnica do trator florestal arrastador “skidder” com diferentes tipos de rodados na extração de madeira em povoamentos de pinus. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1053-1061, 2007.

LOPES, E. S.; TONHATO, L.; RODRIGUES, L. C. K.; SERPE, E. L. Declividade do terreno e distância de extração na produtividade do *forwarder* com guincho de tração auxiliar. **Nativa**, Sinop, v.4, n.6, p.347-352, nov./dez. 2016.

LOPES, S. B. **Efeitos da dependência espacial em modelos de previsão de demanda por transporte**. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

MACDONAGH, P. M. **Avaliação técnico-econômica da extração de Pinus spp. Utilizando tratores com garra no sul do Brasil**. 1994. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. Viçosa: UFV. Cap. 7, p.169-212. 2008.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S. O Setor Florestal Brasileiro e a Colheita Florestal. In: MACHADO, C. C. (Org.). **Colheita florestal**. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, p.01-42. 2008.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. **Colheita florestal**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2014.

MAGYARI-SÁSKA, Z., DOMBAY, S. Determining Minimum Hiking Time Using DEM. **Geographia Napocensis Annual**, VI, Nr. 2, 2012.

MAKKONEN, I. **Evaluation of Timberjack 230 8-Ton Forwarder**. Pointe-Claire, Quebec: Forestry Engineering Research Institute of Canada (Technical Note TN-140). 8p. 1989.

MALINOVSKI, J. R. Considerações básicas no planejamento da colheita de madeira. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTA, 3., 1981, Curitiba. **Anais...** Curitiba : FUPEF. p. 93-100. 1981.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. **Evolução dos sistemas de colheita de pinus na região Sul do Brasil**. Curitiba: FUPEF. 108p. 1998.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 169- 182, 2006.

MALINOVSKI J. R.; MALINOVSKI, R. A. Operações Florestais: Máquinas Purpose-Built versus máquinas adaptadas. **B. Forest**, Edição 34, Ano IV, Curitiba-Pr, Julho, 2017.

MCGAUGHEY, R. J. **FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization**. FUSION Version 3.70, January, 2018.

MINETTE, L. J. **Avaliação técnica e econômica dos tratores florestais transportadores (forwarders), na extração de madeira de eucalipto**. Viçosa: UFV, 1988. 77 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1988.

MINETTE, L. J.; MOREIRA, M. T.; SOUZA, A. S.; MACHADO, C. C.; SILVA, K. R. Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.1, p.91-97, 2004.

MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P.; SILVA, E. P.; MEDEIROS, N. M. Postos de trabalho e perfil de operadores de máquinas de colheita florestal. **Revista Ceres**. Viçosa, MG. v. 55 n. 1, janeiro-fevereiro, p 66-73, 2008.

MOLOGNI, O.; GRIGOLATO, S.; CAVALLI, R. Harvesting systems for steep terrain in the Italian Alps: state of the art and future prospects. **Contemp Eng Sci**, 9(25):1229–1242, 2016.

MONTEIRO, H. M.; BROWN, R. O.; ROBERT, R. C. G. Lean manufacturing na atividade de colheita florestal. **Conhecimento Interativo**, São José dos Pinhais, PR, v. 10, n. 2, p. 27-37, jul./dez. 2016.

MOREIRA F. M. T. **Análise técnica e econômica de subsistemas de colheita de madeira de eucalipto em terceira rotação**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 148 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

NASCIMENTO, A. C.; LEITE, A. M. P.; SOARES, T. S.; FREITAS, L. C. Avaliação Técnica e Econômica da Colheita Florestal com *Feller-Buncher*. **Cerne**, Lavras, MG, v.17, n.1, p. 9-15, 2011.

NOGUEIRA, M. M.; LENTINI, N. W.; PIRES, I. P.; BITTENCOURT, P. G.; ZWEEDE, J.C. Procedimentos simplificados em segurança e saúde do trabalho no manejo florestal. Belém, PA: Instituto Floresta Tropical, **Fundação Floresta Tropical**, 2010.

OLIVEIRA, D.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do *Forwarder* na extração de toras de pinus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 525-533, dez. 2009.

PAULA, E. N. D. S. O. D. **Avaliação técnica, de custos e ambiental de dois modelos de harvester na colheita florestal**. 2011. 82 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foudation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

ROBERT, R. C. G. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita mecanizada em plantios de Eucalyptus spp. em duas condições de relevo acidentado**. 2013. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ROBERT, R. C. G.; TESSARO, F.; PEREIRA, R. S.; SAMPIETRO, J. A.; MALINOVSKI, R. A. Technical analysis of extraction operation performed by a *forwarder* with traction aid winch in an Eucalyptus spp . plantation. **Nativa**, v. 5, p. 290–297, 2017.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S. Análise espacial da compactação do solo causada pelo sistema de colheita de madeira de árvores inteiras. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 65, n.3, p. 227-233, mai/jun, 2018a.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; SAMPIETRO, J. A. Influência do volume das árvores no desempenho do processador florestal harvester em povoamento de eucalipto. **BIOFIX Scientific Journal**. v. 3 n. 2 p. 237-242. 2018b.

ROTTENSTEINER, C. **Vibration analysis of forest operations and road construction**. Doctoral thesis. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, 65 p. 2014.

SALMERON, A. **A mecanização da exploração florestal**. Piracicaba: IPEF. Circular técnica 88. p: 1-10. 1981.

SANTOS, L. S. **Avaliação de métodos de colheita no fomento florestal em relevo acidentado**. 2017. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2017.

SANTOS, L. N.; FERNANDES, H. C.; SILVA, M. L.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, A. P. Avaliação de custos da operação de extração da madeira com *forwarder*. **CERNE**, vol.22, no.1, Lavras, Jan./Mar. 2016.

SANTOS, S. L. M.; MACHADO, C. C. Análise técnico-econômica da processamento de madeira de eucalipto em áreas planas, utilizando o processador. **Revista Árvore**, v. 19, n. 3, p. 346-57, 1995.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L. J.; SOUZA A. P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.5, p.935-942, 2015.

SEIXAS, F; CASTRO, G.P. **Extração**. In: MACHADO, C.C. (Ed.). Colheita florestal. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV. 106-161p. 2014.

SEIXAS, F. **Extração**. In: MACHADO, C.C (Org). Colheita florestal. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária. 468 p. 2002.

SEIXAS, F. **Extração florestal**. In: MACHADO, C. C. Colheita Florestal. 2. ed. Viçosa: UFV. p. 97-145. 2008.

SESSIONS, J.; BETTINGER, P. Hierarchical planning: pathway to the future? Precision forestry:. In: INTERNATIONAL DECISION FORESTRY COOPERATIVE SYMPOSIUM, 1., 2001, Seattle . **Proceedings...** Seattle, Washington. 2001.

SILVA, J. R. M.; TEIXEIRA, R. L. Sobrecarga térmica em fábrica de móveis. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 494-500, 2014.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, F. P. Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um *forwarder* nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.31, p.371-377, 2007.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T. Avaliação técnica e econômica do *forwarder* na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 711-720, 2010.

SOKOLOVIĆ, DŽ.; BAJRIĆ, M. **Otvaranje šuma**. Univerzitet u Sarajevu, Šumarski fakultet, 1–250, 2013.

STÖHR, G. W. D.; LEINERT, S. Importância e aplicação do estudo do trabalho. **Floresta**, v. 9, n. 1, p. 27-38, 1978.

TANAKA, O. P. Exploração e transporte florestal da cultura do eucalipto. **Informe agropecuário**, n. 141, p. 24-30, 1986.

TIERNAN, D; ZELEKE, G.; OWENDE, P. M. O.; KANALI, C. L.; LYONS, J.; WARD, S. M. Effect of working conditions on *forwarder* productivity in cut-to-length timber harvesting on sensitive forest sites in Ireland. **Biosystems Engineering**, Ireland, v.87, p.167-177, 2004.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**. P. 231-240, 1970.

TOBLER, W. **Non-Isotropic Geographic Modeling**. in: Three Presentations on Geographical Analysis and Modeling. Santa Barbara: NCGIA, 1993.

UUSITALO, J. **Introduction to Forest Operations and Technology**. JVP Forest Systems Oy. Kariston Kirjapaino Oy, Hämeenlinna, 287 p. 2010.

VIEIRA, G. C.; FREITAS, L. C.; CERQUEIRA, P. H. A.; SILVA, E. F.; BRITO, G. S.; SOUZA, A. M. Custos Operacionais e de Produção na Atividade mecanizada de Corte Florestal. **Nativa**, Sinop, v.4, n. 5, p. 342-346, 2016.

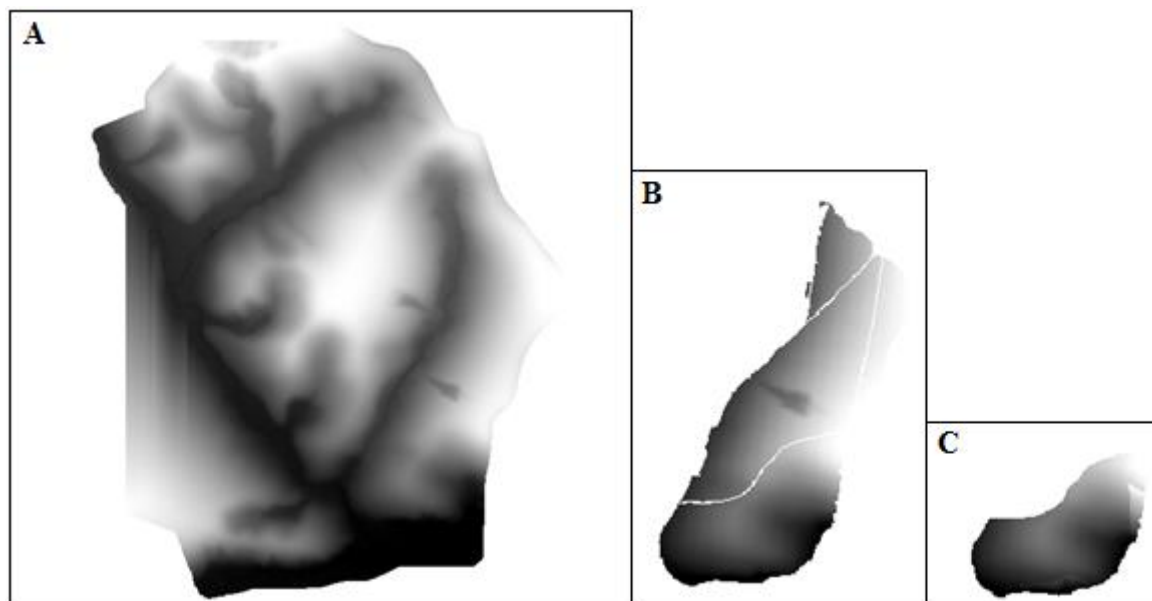
VISSER, R.; STAMPFER, K. Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: a review. **Croat J For Eng**, 36(2):321–331, 2015.



## APÊNDICE

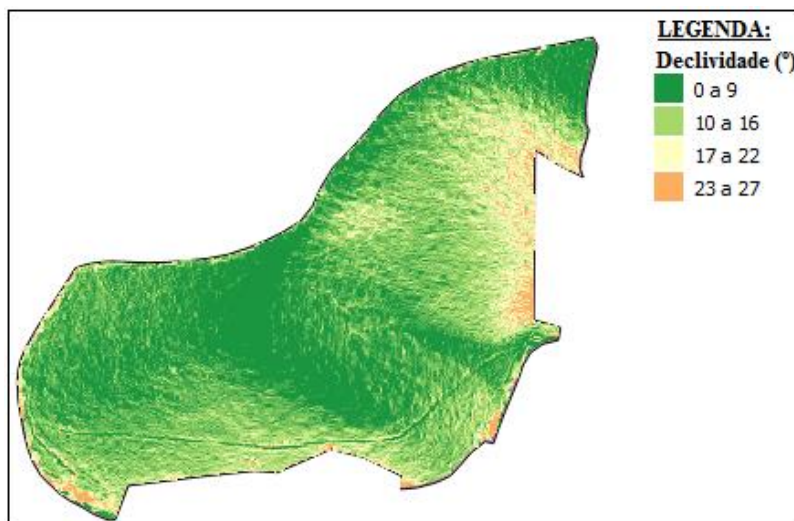
### APÊNDICE A – ILUSTRAÇÕES DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA OBTENÇÃO DA DECLIVIDADE POR MEIO DO SOFTWARE ARCGIS

Figura 19 – A - Modelo digital de elevação (MDE) do projeto; B – Modelo digital de elevação do talhão extraído do MDE do Projeto, e; C – Modelo digital de elevação de um subtalhão extraído do talhão.



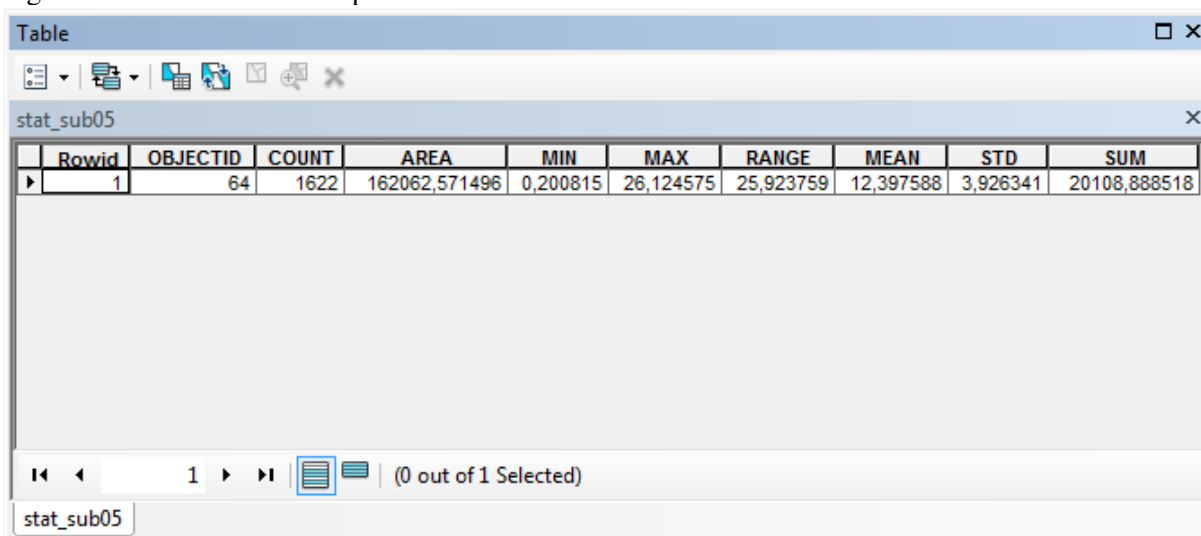
Fonte: Próprio Autor

Figura 20 – Mapa de declividade de um subtalhão.



Fonte: Próprio Autor

Figura 21 – Resultado obtido pela ferramenta “Zonal Statistics as Table”.



Rowid	OBJECTID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	64	1622	162062,571496	0,200815	26,124575	25,923759	12,397588	3,926341	20108,888518

Fonte: Próprio Autor

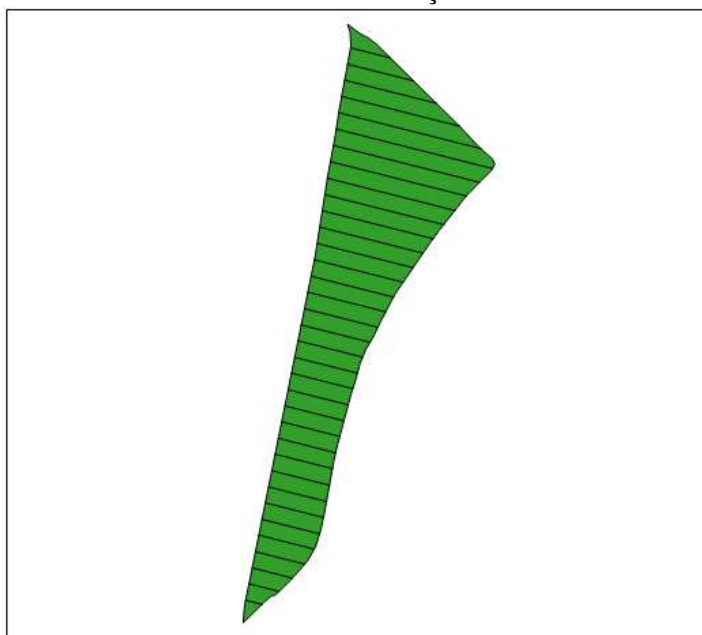
## APÊNDICE B – ILUSTRAÇÕES DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA OBTENÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO POR MEIO DO SOFTWARE ARCGIS

Figura 22 – A – Shapefile do Projeto; B – Shapefile do talhão extraído do projeto, e; C – Shapefile do subtalhão extraído do talhão.



Fonte: Próprio Autor

Figura 23 – Subtalhão apresentando os eitos teóricos de extração.



Fonte: Próprio Autor

Figura 24 – Valores de comprimento, em metros, dos eitos teóricos de extração relacionados na coluna DE.

FID	Shape	Id	DME
0	Polyline	0	15,60095
1	Polyline	0	25,537097
2	Polyline	0	36,124162
3	Polyline	0	44,058835
4	Polyline	0	51,373225
5	Polyline	0	56,442897
6	Polyline	0	59,16353
7	Polyline	0	60,240172
8	Polyline	0	60,461964
9	Polyline	0	60,245973
10	Polyline	0	59,997311
11	Polyline	0	59,758445
12	Polyline	0	59,51467
13	Polyline	0	59,737364
14	Polyline	0	60,29617
15	Polyline	0	61,104397
16	Polyline	0	61,934418
17	Polyline	0	62,76157
18	Polyline	0	63,833601
19	Polyline	0	65,17924
20	Polyline	0	65,958083
21	Polyline	0	68,451937

Fonte: Próprio Autor

Figura 25 – Resultado obtido pela ferramenta “Summary Statistics”.

Rowid	FID	FREQUENCY	MEAN DME	MIN DME	MAX DME
1	0	45	81,408823	15,60095	162,605804

Fonte: Próprio Autor

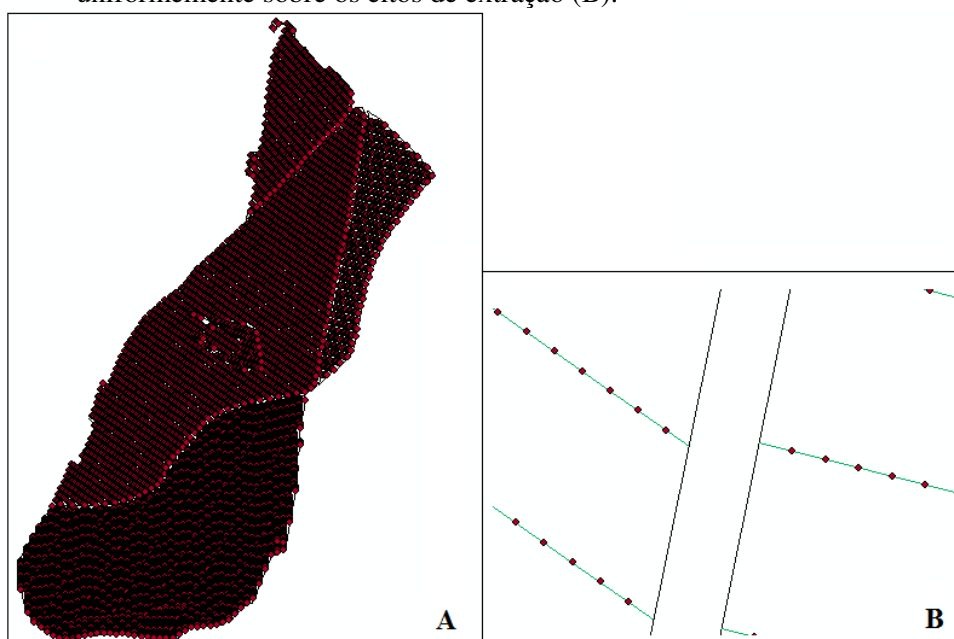
APÊNDICE C – ILUSTRAÇÕES DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DO *FORWARDER* POR MEIO DO SOFTWARE ARCGIS

Figura 26 – Representação do talhão selecionado apresentando os eitos teóricos de extração



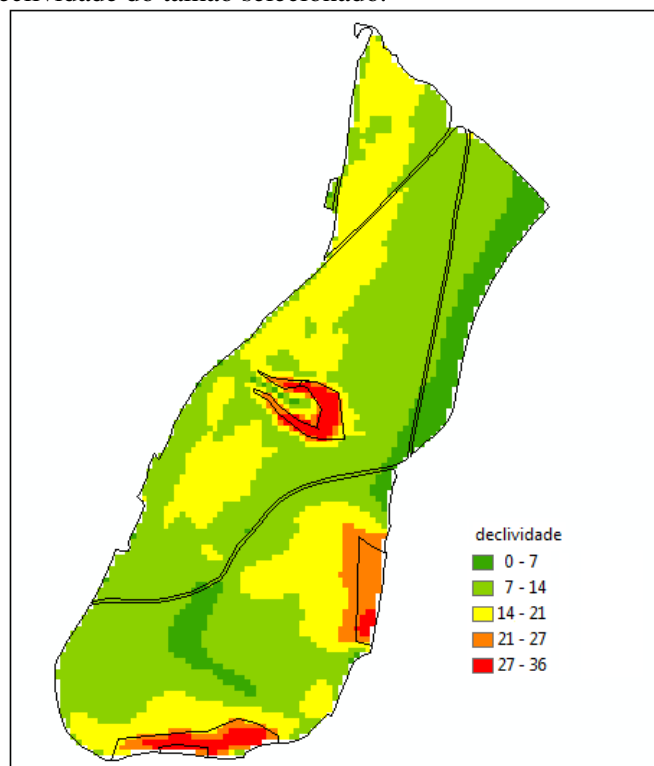
Fonte: Próprio Autor

Figura 27 – Pontos gerados sobre os eitos de extração (A); Detalhe dos pontos distribuídos uniformemente sobre os eitos de extração (B).



Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – Mapa de declividade do talhão selecionado.



Fonte: Próprio Autor

Figura 29 – Valores de inclinação do terreno no sentido de alicé.

Table

eitos\_pontos

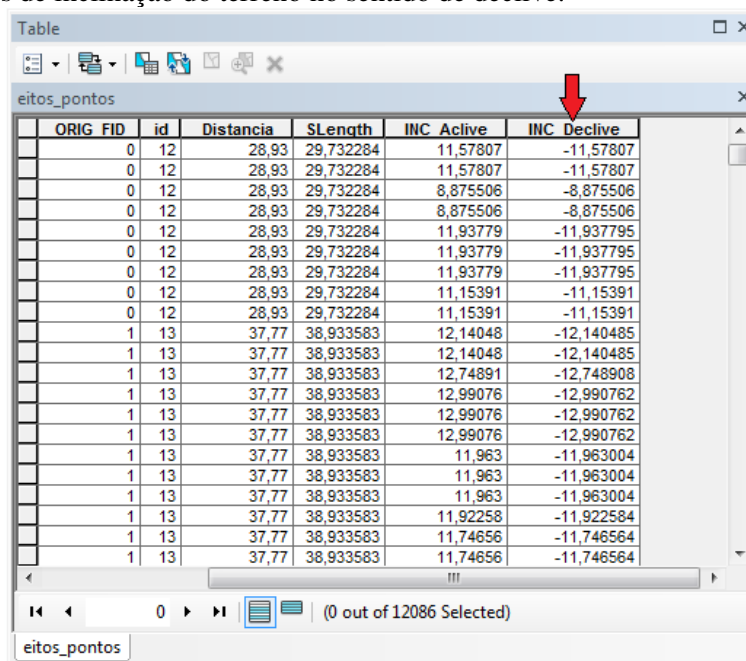
OBJECTID *	Shape *	ORIG FID	id	Distancia	SLength	INC	Active
1	Point	0	12	28,93	29,732284	11,57807	
2	Point	0	12	28,93	29,732284	11,57807	
3	Point	0	12	28,93	29,732284	8,875506	
4	Point	0	12	28,93	29,732284	8,875506	
5	Point	0	12	28,93	29,732284	11,93779	
6	Point	0	12	28,93	29,732284	11,93779	
7	Point	0	12	28,93	29,732284	11,93779	
8	Point	0	12	28,93	29,732284	11,15391	
9	Point	0	12	28,93	29,732284	11,15391	
10	Point	1	13	37,77	38,933583	12,14048	
11	Point	1	13	37,77	38,933583	12,14048	
12	Point	1	13	37,77	38,933583	12,74891	
13	Point	1	13	37,77	38,933583	12,99076	
14	Point	1	13	37,77	38,933583	12,99076	
15	Point	1	13	37,77	38,933583	12,99076	
16	Point	1	13	37,77	38,933583	11,963	
17	Point	1	13	37,77	38,933583	11,963	
18	Point	1	13	37,77	38,933583	11,963	
19	Point	1	13	37,77	38,933583	11,92258	
20	Point	1	13	37,77	38,933583	11,74656	
21	Point	1	13	37,77	38,933583	11,74656	
22	Point	2	14	45,22	46,436075	12,45748	

(0 out of 12086 Selected)

eitos\_pontos

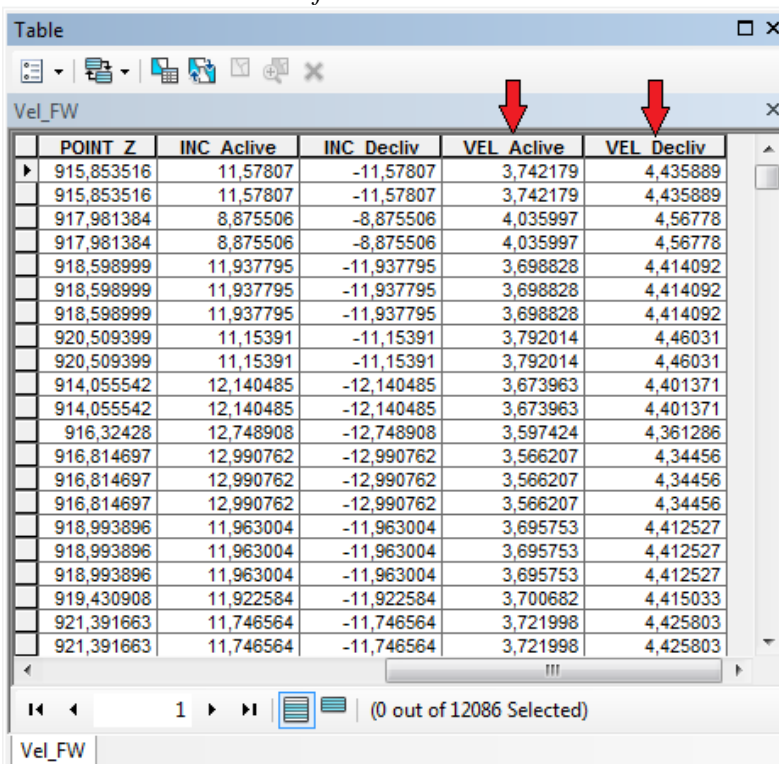
Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – Valores de inclinação do terreno no sentido de declive.



	ORIG	FID	id	Distancia	SLength	INC Active	INC Declive
	0	12	12	28,93	29,732284	11,57807	-11,57807
	0	12	12	28,93	29,732284	11,57807	-11,57807
	0	12	12	28,93	29,732284	8,875506	-8,875506
	0	12	12	28,93	29,732284	8,875506	-8,875506
	0	12	12	28,93	29,732284	11,93779	-11,93779
	0	12	12	28,93	29,732284	11,93779	-11,93779
	0	12	12	28,93	29,732284	11,93779	-11,93779
	0	12	12	28,93	29,732284	11,15391	-11,15391
	0	12	12	28,93	29,732284	11,15391	-11,15391
	1	13	13	37,77	38,933583	12,14048	-12,14048
	1	13	13	37,77	38,933583	12,14048	-12,14048
	1	13	13	37,77	38,933583	12,74891	-12,748908
	1	13	13	37,77	38,933583	12,99076	-12,990762
	1	13	13	37,77	38,933583	12,99076	-12,990762
	1	13	13	37,77	38,933583	12,99076	-12,990762
	1	13	13	37,77	38,933583	11,963	-11,963004
	1	13	13	37,77	38,933583	11,963	-11,963004
	1	13	13	37,77	38,933583	11,963	-11,963004
	1	13	13	37,77	38,933583	11,92258	-11,922584
	1	13	13	37,77	38,933583	11,74656	-11,746564
	1	13	13	37,77	38,933583	11,74656	-11,746564

Fonte: Próprio Autor

Figura 31 – Velocidade de deslocamento do *forwarder* em sentido de active e declive.


	POINT Z	INC Active	INC Decliv	VEL Active	VEL Decliv
▶	915,853516	11,57807	-11,57807	3,742179	4,435889
	915,853516	11,57807	-11,57807	3,742179	4,435889
	917,981384	8,875506	-8,875506	4,035997	4,56778
	917,981384	8,875506	-8,875506	4,035997	4,56778
	918,598999	11,937795	-11,937795	3,698828	4,414092
	918,598999	11,937795	-11,937795	3,698828	4,414092
	918,598999	11,937795	-11,937795	3,698828	4,414092
	920,509399	11,15391	-11,15391	3,792014	4,46031
	920,509399	11,15391	-11,15391	3,792014	4,46031
	914,055542	12,140485	-12,140485	3,673963	4,401371
	914,055542	12,140485	-12,140485	3,673963	4,401371
	916,32428	12,748908	-12,748908	3,597424	4,361286
	916,814697	12,990762	-12,990762	3,566207	4,34456
	916,814697	12,990762	-12,990762	3,566207	4,34456
	916,814697	12,990762	-12,990762	3,566207	4,34456
	918,993896	11,963004	-11,963004	3,695753	4,412527
	918,993896	11,963004	-11,963004	3,695753	4,412527
	918,993896	11,963004	-11,963004	3,695753	4,412527
	919,430908	11,922584	-11,922584	3,700682	4,415033
	921,391663	11,746564	-11,746564	3,721998	4,425803
	921,391663	11,746564	-11,746564	3,721998	4,425803

Fonte: Próprio Autor

## ANEXOS

## ANEXO A – FICHA DE COLETA DE DADOS DE CAMPO PARA ÁREA DE COLHEITA SEM USO DO GUINCHO.

Estudo de Tempo - Forwarder - SEM GUINCHO															
Regional:					Região:					Projeto:					
Máquina:					Código:					Turno:					
Nº Ciclo	Data	Talhão	Hora		Sentido	PEGA	VMI / Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD	Carreg.	DC	Descar.	Observação	
			Início	Fim	A/D										
TOTAL															
						PEGA	VMI / Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD	Carreg.	DC	Descar.	Observação	
TOTAL															
						PEGA	VMI / Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD	Carreg.	DC	Descar.	Observação	
TOTAL															
						PEGA	VMI / Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD	Carreg.	DC	Descar.	Observação	
TOTAL															
						PEGA	VMI / Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD	Carreg.	DC	Descar.	Observação	
TOTAL															
						PEGA	VMI / Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD	Carreg.	DC	Descar.	Observação	
TOTAL															

Legenda: A/D - Active / declive; DD - Deslocamento Descarregado; Carreg. - Carregamento; DC - Deslocamento Carregado; Descar. - Descarregamento



## ANEXO B – FICHA DE COLETA DE DADOS DE CAMPO PARA ÁREA DE COLHEITA COM USO DO GUINCHO.

Estudo de Tempo - Forwarder - COM GUINCHO																
Regional:			Região:		Projeto:			Operador:								
Máquina:			Código:		Turno:			Matrícula:								
Nº Ciclo	Data	Talhão	Sentido A/D	PEGA	VMI/Fator Emp.	Decl. (graus)	Dist. Extração	DD-01	Anc.	DD-02	Carreg.	DC-01	Desanc.	DC-02	Descar.	Observação
TOTAL																
TOTAL																
TOTAL																
TOTAL																
TOTAL																
TOTAL																

Legenda: A/D - Active/Declive; DD-01 - Deslocamento Descarregado 01; Anc. - Ancoragem; DD-02 - Deslocamento Descarregado 02; Carreg. - Carregamento; DC-01 - Deslocamento Carregado 01; Desanc. - Desancoragem; DC-02 - Deslocamento Carregado 02; Descar. - Descarregamento